

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DO MEIO POROSO EM SOLO
ARENOSO ATRAVÉS DE PERMO-POROSÍMETRO A GÁS**

DANIEL FONTOURA CUPERTINO

**MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO 4 - IGLU04”.**

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL
AGOSTO DE 2005

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DO MEIO POROSO EM SOLO
ARENOSO ATRAVÉS DE PERMO-POROSÍMETRO A GÁS

DANIEL FONTOURA CUPERTINO

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO 4 - IGLU04”.

SETOR: GEOFÍSICA

ORIENTADOR: JOSÉ AGNELO SOARES

APROVADA POR:

José Agnelo Soares, MSc. - UFRJ

Gerson Cardoso da Silva Jr., DSc. - UFRJ

Cláudio Bettini, PhD - UFRJ

FICHA CATALOGRÁFICA

Cupertino, Daniel Fontoura.

Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás / Daniel Fontoura Cupertino – Rio de Janeiro, 2005.

xi, 65, f: A4.

Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, 2005.

Orientador: José Agnelo Soares

1.Porosidade 2.Permeabilidade 3.Solos
4.Petrofísica

- Monografia. I. Soares, J.A. (Orient.) II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia.

Aos meus Pais, José Antônio e Ângela,
meus irmãos, Letícia e Leandro,
e minha namorada, Vanessa

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Agnelo, por ter sugerido e me aceitado nesta “empreitada”. A geóloga Ingrid, pela ajuda e pelas amostras. Ao futuro geólogo Rodrigo Stutz Salgueiro, pela sempre bem disposta ajuda.

Pelos empréstimos daqueles livros, que esperamos um dia poder achar na biblioteca do CCMN, agradeço ao geofísico Danian Steinkirch, prof. Abreu, Gerson, e Limeira. Ao geólogo Max, pelas fotografias na lupa binocular.

Aos professores e funcionários do Departamento de Geologia, que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

À “grande” turma de 2001 e agregados: Leonardo, Kosaka, Jorge, Daniel Conceição, Carlos Biavati, Felipe, Gilmar.

Às gurias de 2000, Ana Carolina Tavares, Vanessa Syrio, Melissa Nogueira e Huaila.

INDICE

RESUMO	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE GRÁFICOS	IX
1. INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAL DE ESTUDO	11
2.1 Contexto Geológico	11
2.2 Contexto Pedológico	12
2.3 Amostragem	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 Porosidade	19
3.2 Permeabilidade e a Lei de Darcy	22
3.2.1 <i>FLUXOS GASOSOS REAIS</i>	24
3.2.2 <i>PERMEABILIDADE ABSOLUTA E PERMEABILIDADE RELATIVA</i>	25
3.3 Superfície Específica	26
3.4 Equação de Kozeny-Carman	26
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	28
4.1 Preparação das amostras	28
4.2 Estrutura do Equipamento	29
4.4 Medição da Permeabilidade Absoluta	31
4.5 Cálculo da massa específica	34
4.6 Cálculo da superfície específica	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 Parâmetros obtidos diretamente	35
5.1.1 <i>POROSIDADE ESPECÍFICA</i>	35

5.1.2 PERMEABILIDADE ABSOLUTA	35
5.1.3 MASSA ESPECÍFICA	36
5.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS DIRETAMENTE.	40
5.2 Superfície específica estimada	42
5.3 Comparação com dados externos	44
5.4 Perfis comparativos finais	45
5.5 Análise do efeito da pressão sobre a porosidade e a permeabilidade	49
5.5.1 EFEITO DA PRESSÃO SOBRE A POROSIDADE	49
5.5.2 EFEITO DA PRESSÃO SOBRE A PERMEABILIDADE	51
5.5.3 RESUMO	53
6. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
FATORES DE CONVERSÃO	57
ANEXO I	58
ANEXO II	61

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DO MEIO POROSO EM SOLO ARENOSO ATRAVÉS DE PERMO-POROSÍMETRO A GÁS

DANIEL FONTOURA CUPERTINO

RIO DE JANEIRO, AGOSTO DE 2005

ORIENTADOR: JOSE AGNELO SOARES

SETOR: GEOFÍSICA

Com o intuito de obter valores de porosidade efetiva e permeabilidade absoluta em sedimentos inconsolidados (solos) foi utilizado um permo-porosímetro a gás, baseado na variação de pressão em câmara confinante. Como parte deste trabalho se criou uma rotina própria de operação do equipamento. Os valores de volume de poros são obtidos pela lei de Boyle-Mariotte, que relaciona a variação de volume e pressão de um gás ideal em temperatura constante, enquanto os valores de permeabilidade são obtidos pela lei de Darcy. Objetivou-se, também, o desenvolvimento de um método para análise de sedimentos inconsolidados com o equipamento, já que o mesmo fora projetado apenas para sedimentos consolidados. Isto incluiu o invólucro da amostra e testes adequados para determinação das pressões e fluxos. Os valores medidos de permeabilidade e porosidade foram utilizados na estimativa de outro parâmetro físico dos sedimentos, a superfície específica dos grãos, através da equação de Kozeny-Carman, com a constante de Kozeny-Carman igual a 5, a qual é recomendada para fluxos em meios porosos inconsolidados. Observou-se um comportamento inversamente proporcional da superfície específica com a permeabilidade, pois em sedimentos semi-esféricos e inconsolidados, amostras menos permeáveis apresentam granulometria mais fina e, conseqüentemente, maior superfície específica. A comparação dos teores de argila e silte com a permeabilidade mostrou que valores mais elevados de superfície específica coincidiam com granulometrias mais finas, ou menos permeáveis, como esperado. Não foram observadas relações lineares entre a porosidade e a massa específica e entre a permeabilidade e a massa específica. O equipamento exige que as amostras sejam submetidas a uma pressão confinante mínima de 400 psi, para evitar a passagem de gás no contato amostra/recipiente. Como as amostras de solo analisadas provêm de no máximo 5m de profundidade, foi feito um estudo da influência da pressão confinante sobre as porosidades e permeabilidades medidas. Para isto, essas propriedades foram medidas a diferentes pressões confinantes, sendo que para cada amostra estudada ajustou-se uma função aos dados, podendo-se assim prever os valores de porosidade e permeabilidade a qualquer pressão, inclusive sob pressão atmosférica (14,7 psi). Os resultados obtidos indicam que o erro relativo induzido pela pressão confinante mínima de operação do equipamento

foi, para a porosidade, de no máximo 8,6%, e para a permeabilidade, no máximo 13,5%. Embora a pressão confinante mínima exigida tenda a reduzir os valores dessas propriedades, por outro lado, a própria deformação do solo induzida pela coleta das amostras tenderia a neutralizar, pelo menos parcialmente, o efeito desse erro. Enfim, o método de medição das propriedades do meio poroso através do método de injeção de gás se mostrou bastante adequado para o tipo de solo estudado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa Geológico e localização da área estudada.	13
Figura 2 - Mapa Pedológico e localização da área estudada.	14
Figura 3a - Perfil geológico do poço SD-02.	16
Figura 3b - Perfil geológico do poço SD-03.	17
Figura 4 - Fotografias de distintos tipos de sedimentos inconsolidados coletados	18
Figura 5 - Empacotamentos ideais de esferas e suas respectivas porosidades.	21
Figura 6 - Arranjo em colméia de siltes e argilas.	21
Figura 7 - Esboco esquemático de dispositivo usado por Darcy.	23
Figura 8 - Fatia de um meio poroso dx atravessada por uma taxa de fluxo Q .	23
Figura 9 - Fluxo linear de um gás perfeito em tubo preenchido por areia	24
Figura 10 - Amostras inconsolidadas encapsuladas	29
Figura 11 - Esquema geral da câmara de compressão hidrostática do permo-porosímetro	31
Figura 12 - Fotografia do UltraPoro-Perm® 500.	31
Figura 13 - Esquema de funcionamento do Porosímetro.	32
Figura 14 - Esquema de funcionamento do Permeâmetro.	32
Figura 15 - Perfis de porosidade efetiva e perfis geológicos	37
Figura 16 - Perfis de permeabilidade absoluta e perfis geológicos	38
Figura 17 - Perfis da massa específica e perfis geológicos	39
Figura 18 - Perfil composto de permeabilidade e superfície específica e perfil geológico	46
Figura 19 - Perfil composto de permeabilidade e teor de silte+argila e perfil geológico	47
Figura 20 - Perfil composto do teor de silte+argila e superfície específica e perfil geológico	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação da porosidade com a permeabilidade.	40
Gráfico 2a - Relação da porosidade com massa específica.	41
Gráfico 2b - Relação permeabilidade com massa específica.	41
Gráfico 3a - Relação da porosidade com a superfície específica.	42
Gráfico 3b - Relação da permeabilidade com a superfície específica.	42
Gráfico 4 - Relação da massa específica com a superfície específica.	43
Gráfico 5 - Relação do teor de argila com a superfície específica.	44
Gráfico 6 - Curvas ajustadas aos dados de porosidade com a variação de pressão	50
Gráfico 7a - Curvas ajustadas aos dados de permeabilidade com a variação de pressão.	51
Gráfico 7b - Curvas ajustadas aos dados de permeabilidade com a variação de pressão.	52
Gráfico 8 - Curvas de comportamento da porosidade em função da pressão	53
Gráfico 9 - Curvas de comportamento da permeabilidade em função da pressão	54

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo investigar algumas propriedades físicas do meio poroso de um conjunto de amostras provenientes de uma área de estudo onde são desenvolvidas pesquisas relativas à contaminação do solo por hidrocarbonetos. Para isto, foi utilizado um equipamento para a medição do volume poroso e da permeabilidade de amostras através da injeção de gás. O referido equipamento foi desenvolvido para uso em amostras consolidadas (rochas), portanto a sua utilização em amostras de sedimentos inconsolidados exigiu uma adaptação no método e, principalmente, na preparação das amostras.

A caracterização das propriedades do meio poroso é uma etapa essencial em qualquer estudo de fluxo de fluidos. Qualquer diagnóstico geoambiental inclui a modelagem da dispersão dos possíveis contaminantes na área de interesse. Diversos aplicativos eficientes de modelagem hidrogeológica estão disponíveis no mercado. No entanto, qualquer deles exige uma série de parâmetros de entrada cujo conhecimento prévio é de importância fundamental para a previsão do comportamento dinâmico da possível pluma de contaminante e, portanto, do seu impacto sobre a qualidade do solo e da água subterrânea da área estudada. Dentre esses parâmetros de entrada incluem-se a porosidade e a permeabilidade das diversas camadas do solo.

Tradicionalmente estas propriedades são obtidas em laboratório através de métodos que envolvem a saturação e/ou fluxo de água nas amostras coletadas no campo. A porosidade é, em geral, obtida através da diferença de peso da amostra nas condições seca e saturada. Já a permeabilidade, em laboratório, é obtida pela medição da vazão de água que flui através da amostra sob condição controlada de carga. A permeabilidade pode ainda ser estimada no campo através de métodos de injeção ou bombeamento de água. A precisão obtida nestes métodos tende a ser inferior à precisão do método de injeção controlada de gás, adotada neste trabalho.

2. MATERIAL DE ESTUDO

Neste trabalho foram utilizadas amostras de solo coletadas em uma área objeto de pesquisas ambientais de interesse da indústria. As análises aqui reportadas estão inseridas em um convênio Universidade-Empresa, o qual é regido por um instrumento contratual com cláusula de sigilo. Por esta razão, não será fornecida a localização detalhada da área. No entanto, os resultados das análises e sua interpretação foram gentilmente abertos à divulgação.

2.1 Contexto Geológico

Sucintamente, conforme Nascimento (2002), a geologia da área é composta de um embasamento cristalino pré-cambriano (proterozóico superior), uma sequência eopaleozóica (cambro-ordoviciano) e sedimentos cenozóicos pleistocênicos e holocênicos (Fig. 1).

No embasamento ocorre a suíte intrusiva Pedras Grandes (Psypg), composta por corpos graníticos homogêneos, não deformados. São geralmente granitos e granodioritos de cores rósea a cinza clara, e granulações desde fina até grosseira, com deformação cataclástica local.

A sequência eopaleozóica é representada pela Formação Cambirela (Eca), constituída de rochas vulcânicas a subvulcânicas de composição ácida que ocorrem na forma de derrames ou diques. Ocorrem riolitos extrusivos de matriz vítrea com fenocristais de quartzo e feldspato potássico e granitos subvulcânicos porfiríticos avermelhados a castanho-acinzentados.

Os sedimentos cenozóicos pleistocênicos são representados por sedimentos colúvio-alúvio-eluviais indiferenciados (QPca) e sedimentos marinhos litorâneos e eólicos retrabalhados (QPm). Os sedimentos holocênicos são constituídos por sedimentos siltico-argilo-arenosos de lagunas e baías (Qhl), sedimentos marinhos litorâneos (Qhm) e sedimentos siltico-argilo-arenosos com matéria orgânica, típicos de área de mangue (Qhmg).

Dois poços, SD-02 e SD-03, foram perfurados na cobertura sedimentar quaternária, constituída por depósitos inconsolidados ou fracamente consolidados de sedimentos marinhos litorâneos holocênicos. Estes poços podem ainda apresentar

pequena presença de sedimentos siltico-argilo-arenosos de lagunas e baías holocênicas mais jovens (Fig. 1).

2.2 Contexto Pedológico

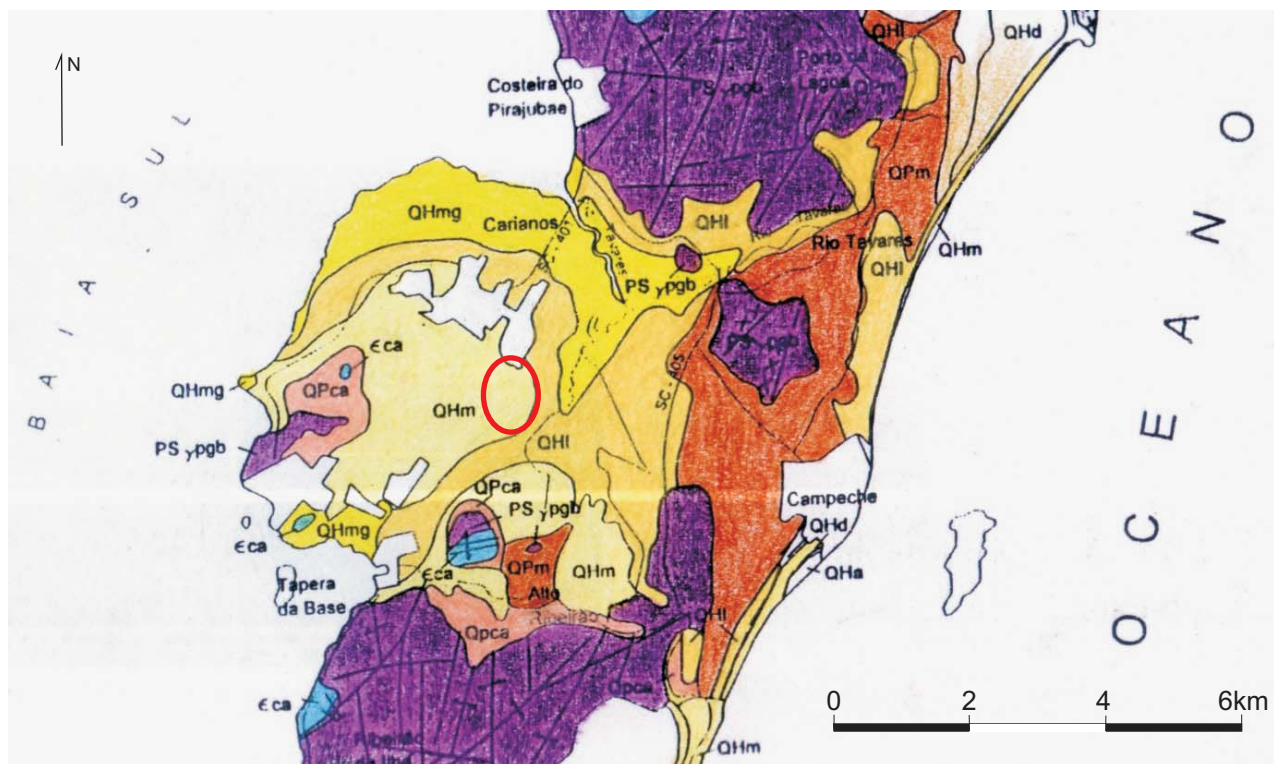
Os tipos de solos predominantes na área estudada e seus arredores podem ser agrupados, conforme Nascimento (2002), em três grupos: podzólico vermelho-amarelo álico, areias quartzosas hidromórficas álicas e solos indiscriminados de mangue (Fig. 2).

Os solos podzólicos ou argissolos vermelho-amarelo apresentam migração de argila do horizonte A para o B, criando uma diferença de textura entre estes horizontes (A fica mais arenoso e B mais argiloso). Podem ocorrer até aproximadamente 1,5m de profundidade. São solos característicos de relevos mais ondulados – encostas de montanhas, morros e colinas. Os argissolos vermelho-amarelo geralmente derivam de intemperismo de granitos, e apresentam textura areno-argilosa, não possuindo boa fertilidade. Os argissolos vermelhos originam-se da alteração de diabásios e apresentam textura argilosa, sendo mais férteis que o argissolo vermelho-amarelo.

Os neossolos quartzareníticos hidromórficos são arenosos e profundos (ocorrendo de 1,0m a 3,0m de profundidade), apresentam baixa fertilidade e pouca capacidade de retenção de água, em virtude da textura arenosa. Contudo são encharcados pela presença do lençol freático próximo à superfície. Podem apresentar acúmulo de matéria orgânica, tornando-se acinzentados. Ocorrem em planícies e depósitos de dunas antigas, nas áreas mais baixas do relevo.

As areias quartzosas hidromórficas álicas estão divididas no mapa da figura 2 em: AQH1, areias quartzosas hidromórficas álicas A proeminente; AQH2, areias quartzosas hidromórficas álicas A proeminente + areias quartzosas marinhas álicas A moderado; AQH4, associação complexa de areias quartzosas hidromórficas álicas A proeminente + podzol hidromórfico álico A moderado (textura arenosa) + gleissolo eutrófico Ta a moderado (textura média).

Os poços SD-02 e SD-03 estão localizados na área da unidade AQH4 (Fig. 2).



MAPA GEOLÓGICO

Legenda:









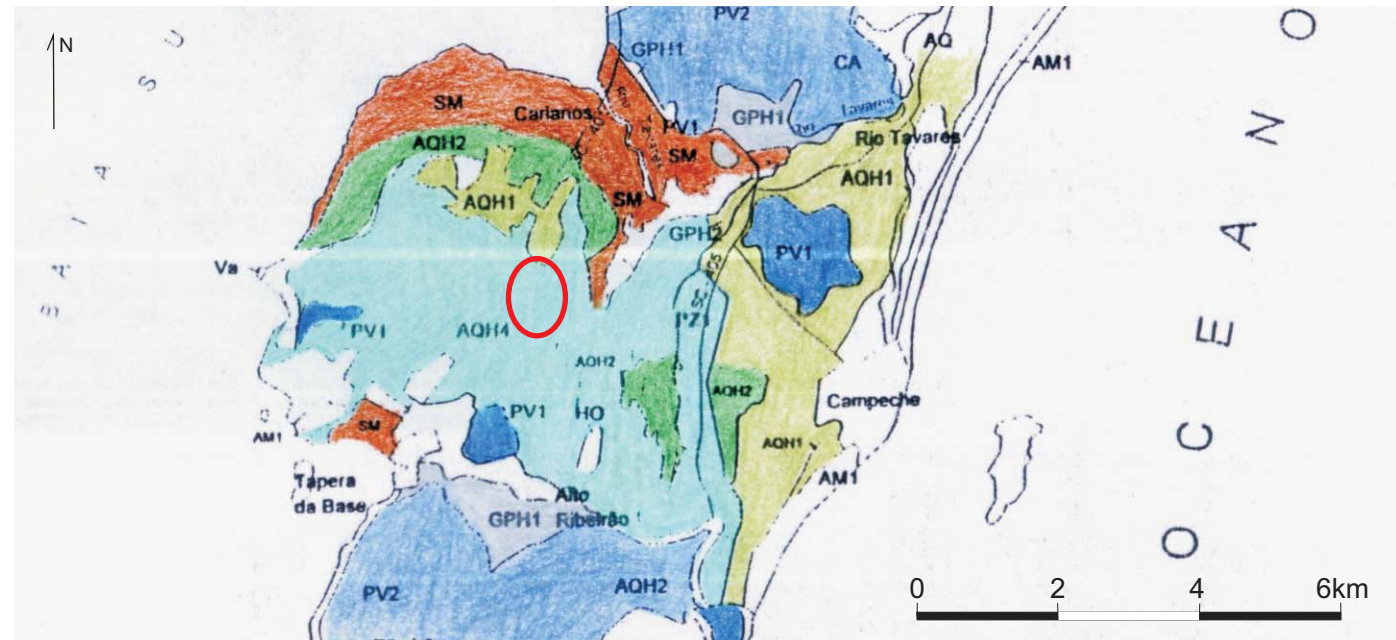
-  QHmg - sedimentos de mangue.
-  QHm - sedimentos marinhos litorâneos.
-  QHl - sedimentos de lagunas e baías.
-  QPm - sedimentos marinhos litorâneos e eólicos retrabalhados.
-  Qpca - sedimentos colúvio-alúvio-eluviais indiferenciados.
-  Eca - formação Cambirela.
-  Ps pg - suite intrusiva Pedras Grandes.
-  Localização da área estudada.

Figura 1 - Mapa Geológico e localização da área estudada. Fonte IBGE 1997.

MAPA PEDOLÓGICO



SM - solos indiscriminados de mangue.



AQH1 - areias quartzosas hidromórficas álicas A proeminente de relevo plano.



AQH2 - areias quartzosas hidromórficas álicas A proeminente + areias quartzosas marinhas álicas a moderado relevo plano.



AQH4 - associação complexa de areias quartzosas hidromórficas álicas A proeminente + podzol hidromórfico álico a moderado textura arenosa + gleissolo eutrófico Ta a moderado textura média relevo plano.



PV2 - podzólico vermelho-amarelo álico Tb A moderado textura média e média/argilosa castanhenta e não castanhenta fase rochosa relevo forte ondulado e montanhoso.



PV1 - podzólico vermelho-amarelo álico Tb A moderado textura média e média/argilosa fase rochosa.



Localização da área estudada.

Figura 2 - Mapa Pedológico e localização da área estudada. Fonte IBGE 1997.

2.3 Amostragem

Foram estudadas 31 amostras providas de 2 poços estratigráficos, SD-02 e SD-03 (Fig. 3a,b). Os poços atravessam sedimentos inconsolidados arenosos quartzosos, diferenciados por:

- a) granulometria, variando de areia muito fina a areia fina;
- b) argilosidade;
- c) composição mineralógica, predominantemente quartzosa, podendo ter grãos de mica;
- d) cor, variando entre branco, róseo, bege, marrom e cinza;
- e) presença de raízes vegetais.

A figura 4 ilustra alguns destes tipos de sedimentos visualizados em lupa binocular com aumento de 25x.

Na Figura 4, a amostra 3 do poço SD-02 é composta por areia fina marrom escuro quartzosa com raízes esparsas. Sua coloração escura é consequência da acumulação de matéria orgânica, tornando o solo quartzoso um pouco mais fértil. A amostra 13 do poço SD-02 é uma areia muito fina, branca, composta por quartzo, moderada a bem selecionada, típica de depósitos quartzosos marinhos ou eólicos. Já a amostra 6 do poço SD-03 é uma areia fina marrom claro, com baixo grau de seleção e maturidade. Seus grãos não são formados apenas por quartzo, ocorrendo entre estes sedimentos de granulometria mais fina (silte e argila) de coloração marrom.

PERFIL CONSTRUTIVO E GEOLÓGICO

Diâmetro de perfuração: 8"
 Diâmetro de revestimento: 4"
 Data: 24/01/2005
 Sondagem nº: **SD- 02**

Tipo de perfuração: rotativa (SONDEC 200)

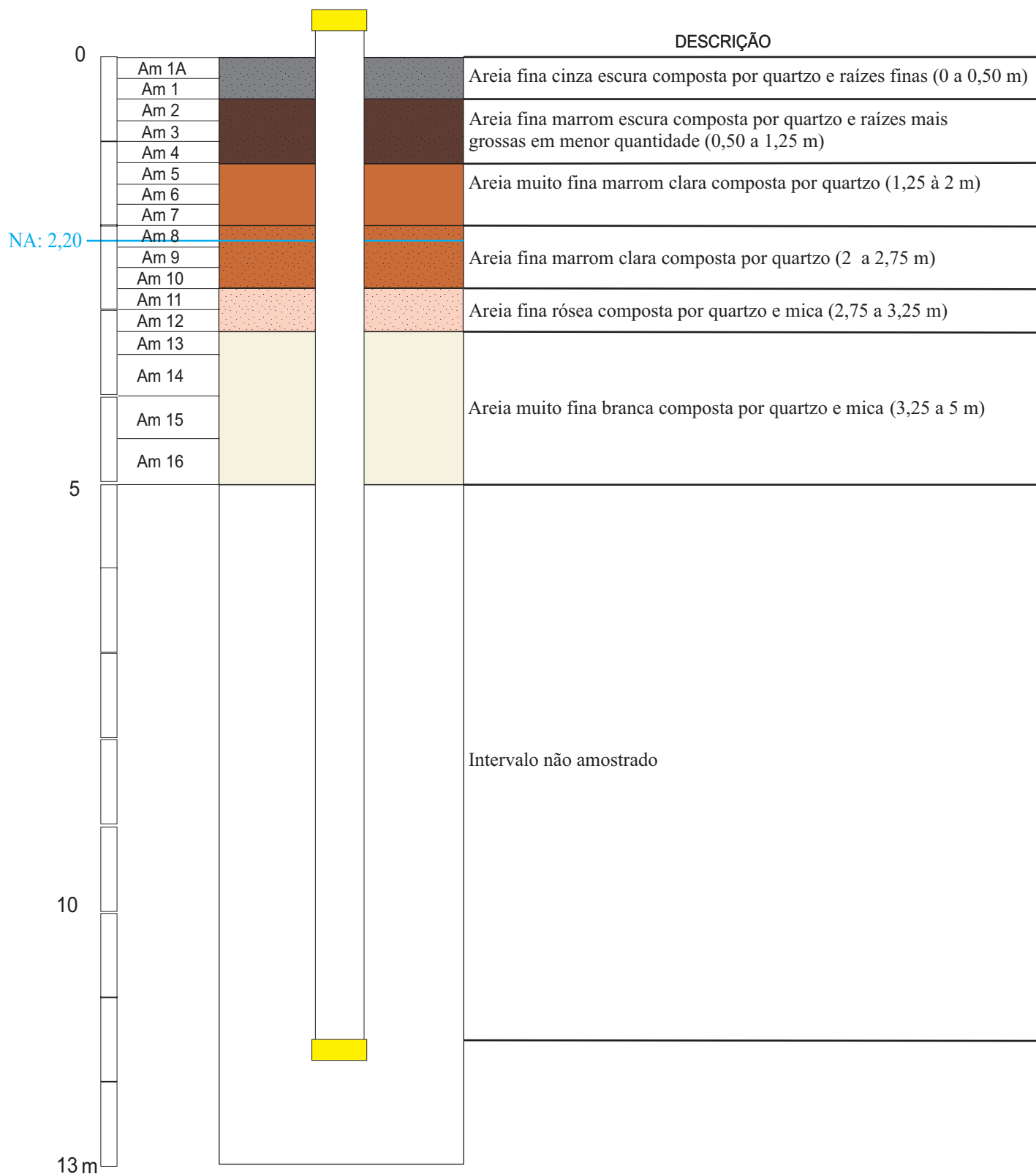


Figura 3a - Perfil geológico do poço SD-02.

PERFIL CONSTRUTIVO E GEOLÓGICO

Diâmetro de perfuração: 8"
 Diâmetro de revestimento: 4"
 Data: 25/01/2005
 Sondagem nº: **SD- 03**

Tipo de perfuração: rotativa (SONDEC 200)

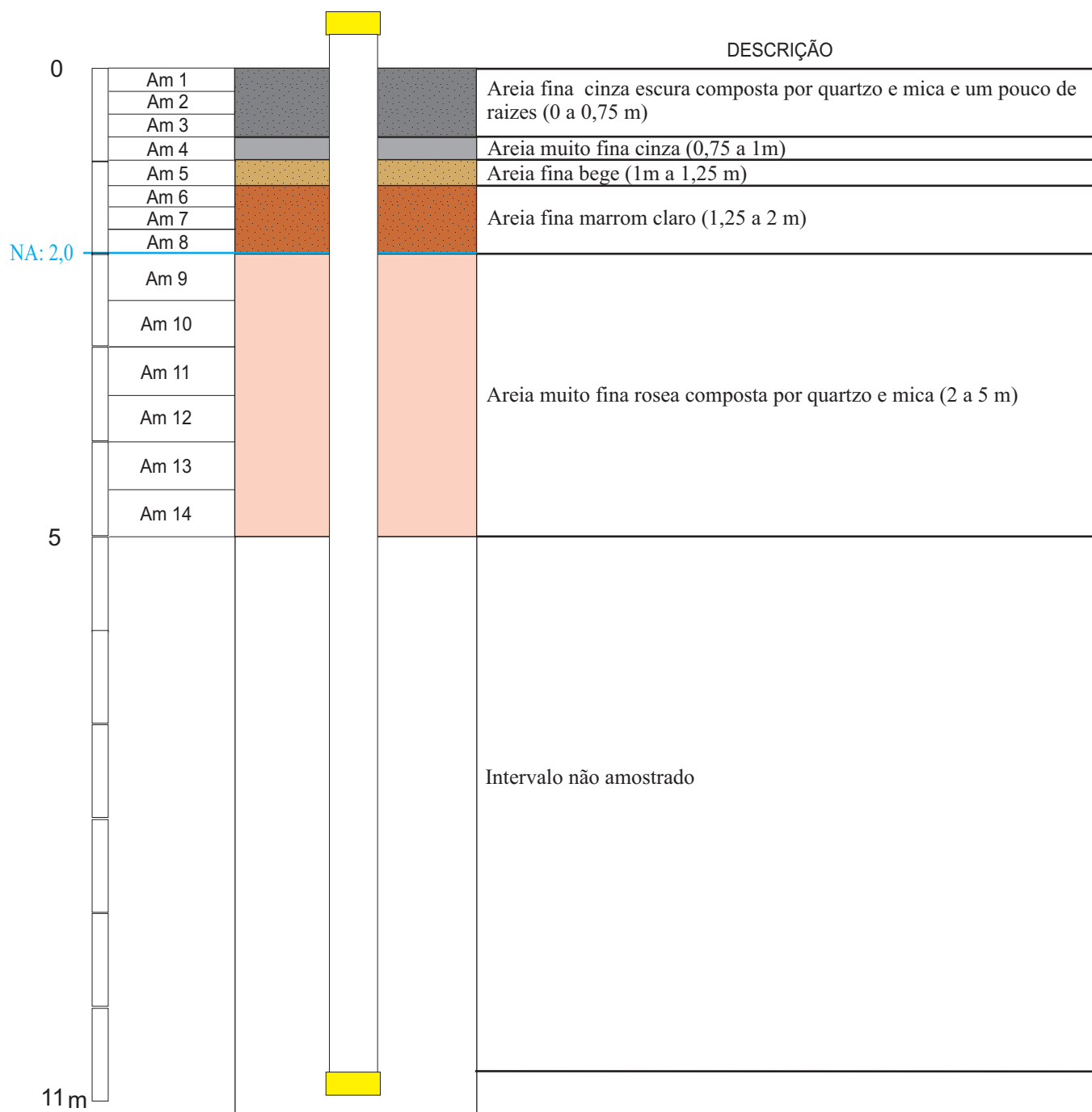


Figura 3b - Perfil geológico do poço SD-03.

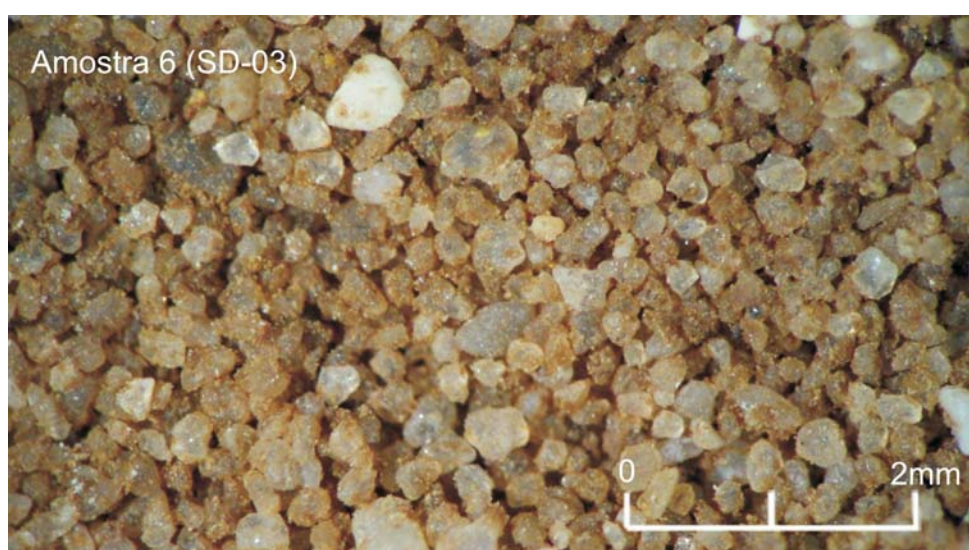
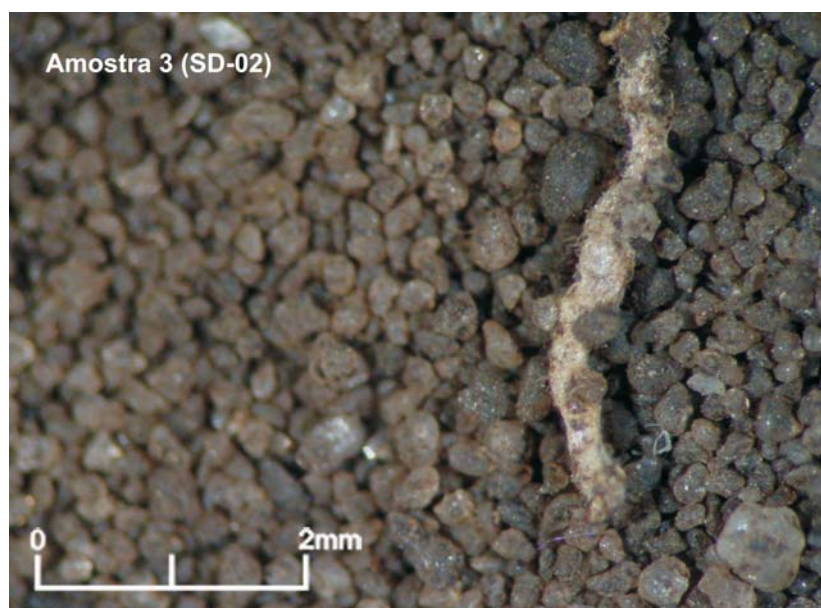


Figura 4 - Fotografias de distintos tipos de sedimentos inconsolidados coletados nos poços SD-02 e SD-03. Obtidas a partir de lupa binocular Zeiss em aumento de 25x.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Porosidade

Rochas sedimentares e solos consistem em grãos de matéria sólida com formas variadas, mais ou menos cimentadas, entre os quais existem espaços vazios. Esses espaços vazios têm a capacidade de conter fluidos, tais como água ou hidrocarbonetos líquidos ou gasosos, e permitir a circulação dos mesmos. Nesse caso, a rocha é classificada como porosa e permeável.

Se considerarmos uma amostra de rocha de qualquer forma (geométrica ou não):

V_t = volume total (ou aparente) da amostra;

V_p = volume dos espaços vazios entre os grãos sólidos (ou volume de poros);

V_s = volume real dos grãos.

A porosidade da amostra é a razão de V_p sobre V_t :

$$\text{porosidade} = \frac{\text{volume de poros}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total} - \text{volume de sólidos}}{\text{volume total}}$$

Porosidade é geralmente designada pela letra Φ . Ela é expressa como uma percentagem ou proporção (Monicard 1980):

$$\phi(\%) = \frac{V_p}{V_t} \cdot 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \cdot 100 \quad (1)$$

A porosidade efetiva de uma amostra é a razão entre o volume dos poros interconectados e o volume total da amostra. Podem existir na amostra, poros que não estão interconectados, este fato resulta numa porosidade residual. A porosidade total, que é a soma da porosidade efetiva mais a porosidade residual, é obtida por métodos elétricos ou nucleares e não será discutida neste trabalho, bem como a porosidade residual.

A porosidade varia com o tamanho e a forma dos grãos e também com a distribuição espacial dos mesmos. Analisando um possível empacotamento regular de esferas de tamanhos aproximadamente iguais, podemos estimar as possibilidades máximas e mínimas de densidade, porosidade e razão de vazios que ocorrem nas tramas de sedimentos bem selecionados e maduros. As figuras 5a, b, d, e, f mostram

alguns possíveis arranjos, onde as porosidades associadas variam em percentual de 25,95% a 47,64%, para esferas uniformes com tamanho de grãos iguais (Mitchell 1976).

Se considerarmos arranjos de grãos esféricos com granulometrias diferentes, a porosidade será inferior à registrada para o mesmo arranjo mas com grãos de mesmo tamanho. Por exemplo, para um arranjo cúbico com duas granulometrias diferentes (Fig. 5c), Monicard (1980) mostra que a porosidade pode ser tão baixa quanto 12,5%.

Segundo Mitchell (1976), partículas quartzosas de granulometria silte sedimentadas em água podem apresentar razões de vazios altas. Em arranjos de multigrãos formados em sedimentação lenta, sendo a faixa granulométrica das partículas suficientemente fina, a estrutura do arranjo pode ser influenciada pelas forças superficiais, formando arranjos em “colméia” (Fig. 6), apresentando alta porosidade e baixa permeabilidade.

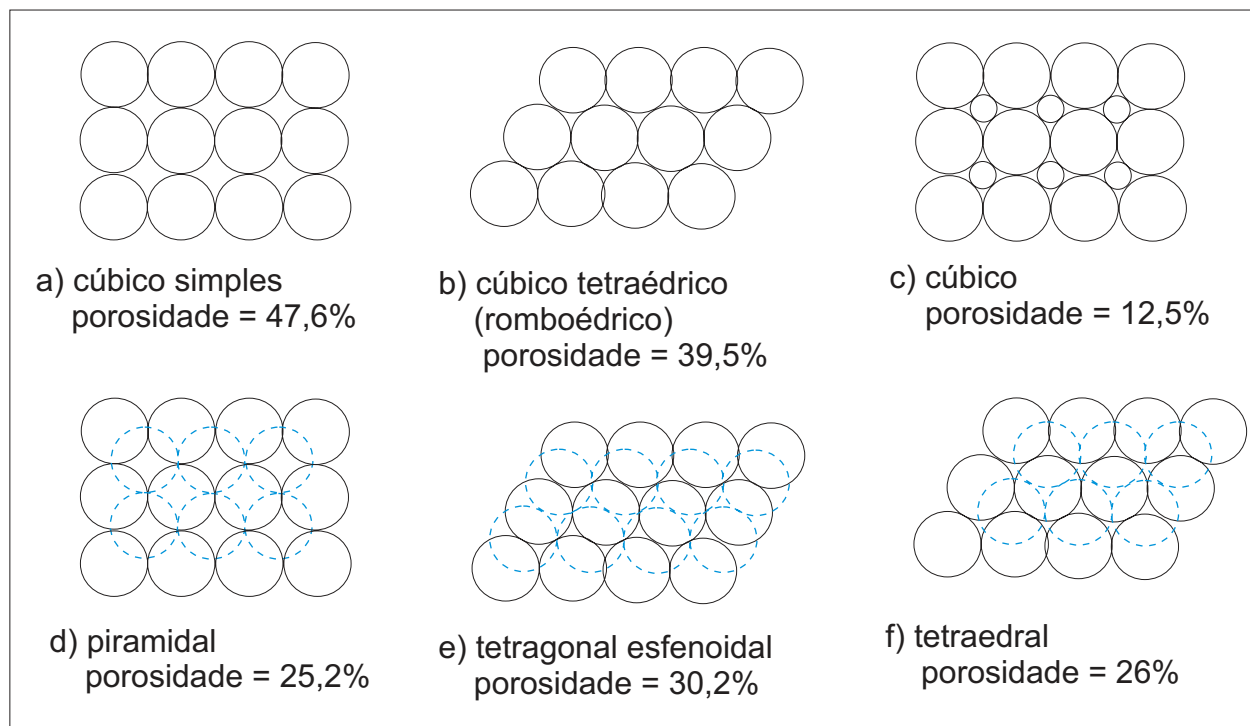


Figura 5 - Empacotamentos ideais de esferas uniformes com tamanho de grãos iguais (a, b, d, e, f) e com dois tamanhos de grãos (c) e suas respectivas porosidades aproximadas. (modificado de Mitchell 1976 e Monicard 1980)

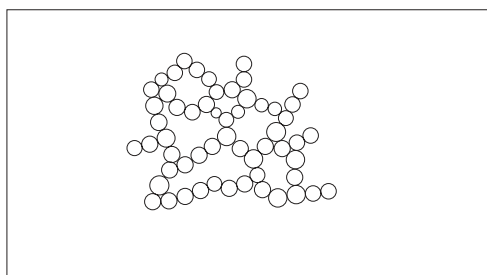


Figura 6 - Arranjo em colméia de siltes e argilas.

3.2 Permeabilidade e a Lei de Darcy

A permeabilidade caracteriza a habilidade das rochas em permitir a circulação de fluidos contidos em seus poros. Em 1856, Henry Darcy, pesquisava o escoamento de água em um filtro de areia (Fig. 7). Concluiu que a vazão do escoamento (volume por unidade de tempo) era:

- proporcional à seção transversal A do filtro;
- proporcional à diferença de cargas hidráulicas h_1 e h_2 entre os piezômetros;
- inversamente proporcional à distância L entre os piezômetros.

Então podemos escrever a fórmula de Darcy como:

$$Q = K A \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (2)$$

Onde K é o coeficiente de proporcionalidade, chamado, para fluidos aquosos, de condutividade hidráulica [L/T].

A equação (2) foi mais tarde modificada pela introdução da viscosidade do fluido, tornando-a adequada para definir a permeabilidade intrínseca, sendo ainda generalizada pela substituição das cargas hidráulicas h_1 e h_2 por pressões.

Conforme o esquema apresentado na Figura 8, vamos considerar uma fatia de um meio poroso com espessura dx e seção transversal A , atravessada perpendicularmente em sua face por uma taxa de fluxo Q de um fluido de viscosidade μ sob uma diferença de pressão dp .

Podemos escrever a lei de Darcy, na sua forma generalizada, da seguinte forma:

$$dp = \frac{\mu}{k} \cdot \frac{Q}{A} dx \quad \text{ou} \quad Q = \frac{Ak}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

com o coeficiente k sendo a permeabilidade da fatia do meio poroso.

A lei de Darcy supõe que:

- não há reação entre o fluido e a rocha;
- apenas um fluido está presente.

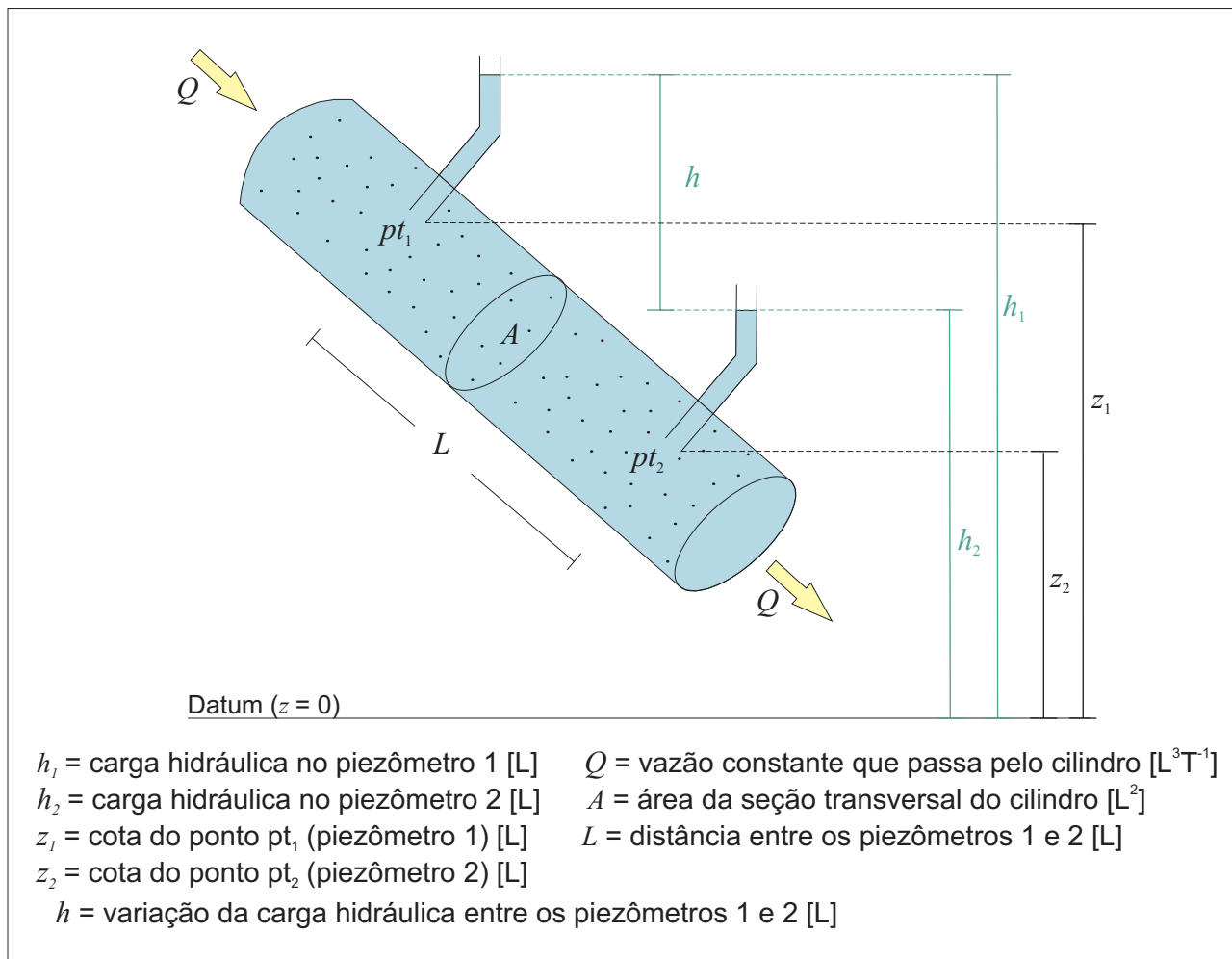


Figura 7 - Esboço esquemático de dispositivo usado por Darcy. (modificado de Cabral 2000)

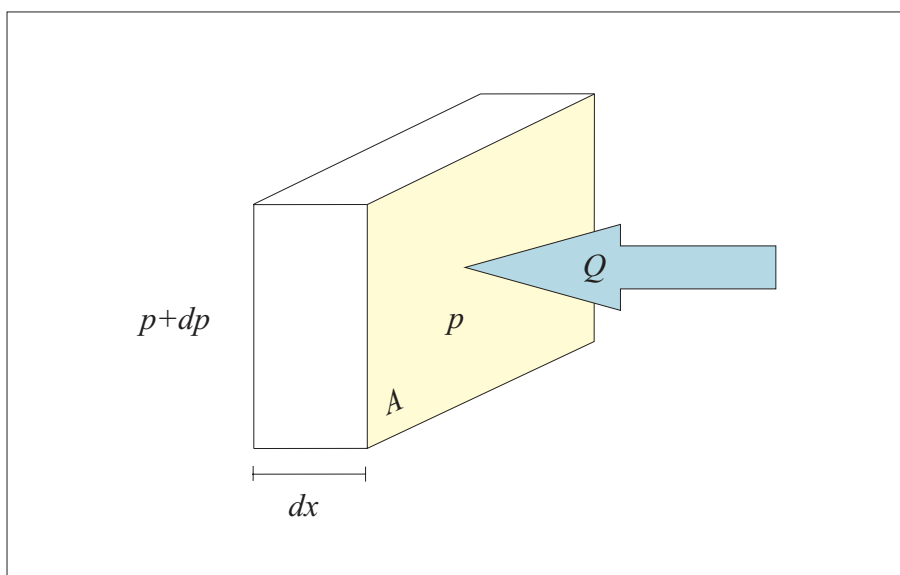


Figura 8 - Fatia de um meio poroso dx atravessada por uma taxa de fluxo Q .

De acordo com Monicard (1980), a permeabilidade é reduzida se há reação entre o fluido e a rocha. Ocorre também uma redução na permeabilidade para cada fase quando fluidos variados estão presentes. A permeabilidade definida pela equação de Darcy é dependente do fluxo laminar em meio poroso. Este fluxo laminar nem sempre é alcançado, principalmente em fluxos gasosos.

3.2.1 FLUXOS GASOSOS REAIS

Imagine um tubo de metal preenchido com areia onde existe um fluxo perfeito (Fig. 9). As pressões de injeção e saída, respectivamente P_1 e P_2 , são constantes. O fluxo de massa Q_m é o mesmo em todas as fatias transversais e, para cada fatia, há uma taxa de fluxo volumétrico Q que assim se relaciona com Q_m :

$$Q_m = Q\rho \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica do gás na fatia em que a pressão é p .

temos: $\rho = bp$; com $b = \text{constante}$, onde $Q_m = Qbp$

$$Q = \frac{1}{bp} \cdot Q_m \quad (5)$$

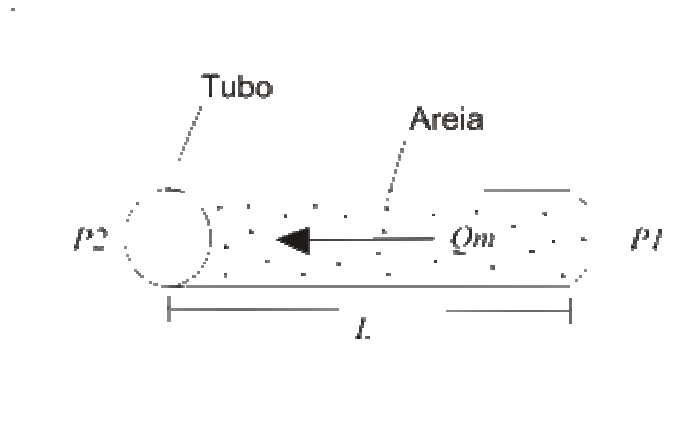


Figura 9 - Fluxo linear de um gás perfeito em tubo preenchido por areia (Modificado de Monicard 1980)

Levando em conta a equação (3), obtemos:

$$b p \cdot dp = \frac{\mu Q_m}{A k} \cdot dx \quad (6)$$

que é uma equação diferencial relacionando a pressão p com a distância x .

Após a integração (para uma espessura L) temos:

$$\frac{b}{2} \cdot (P_1^2 - P_2^2) = \frac{\mu Q_m}{Ak} \cdot L \quad (7)$$

com Q medido na pressão p e temperatura constante, e ainda levando em conta que $Q_m = Qbp$, temos que:

$$Q = \frac{Ak}{\mu L} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{2p} \quad (8)$$

Esta equação é de extrema importância, pois fundamenta os cálculos de permeabilidade no equipamento descrito no capítulo 4.

3.2.2 PERMEABILIDADE ABSOLUTA E PERMEABILIDADE RELATIVA

A permeabilidade intrínseca ou absoluta k , chamada por alguns de permeabilidade específica, é função do tipo do material poroso, sua granulometria e sua disposição estrutural. Normalmente se expressa k em cm^2 , Darcy (D) ou ainda seu submúltiplo miliDarcy (mD).

O coeficiente de proporcionalidade K , chamado de permeabilidade relativa ou condutividade hidráulica, leva em conta características do meio, como porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, e as características do fluido, como viscosidade e massa específica. Normalmente K é expressa em m/s ou cm/s.

As permeabilidades absoluta e relativa se relacionam pela equação:

$$K = k \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad (9)$$

K = permeabilidade relativa [L/T]

k = permeabilidade intrínseca do meio poroso [L^2]

ρ e μ = representam as características do fluido, respectivamente massa específica e viscosidade absoluta.

g = aceleração da gravidade [LT^2]

A permeabilidade depende das dimensões e do arranjo dos poros. Em geral, arenitos bastante porosos e de granulação grossa têm alta permeabilidade, enquanto que arenitos com granulações finas tendem a ter baixa permeabilidade. Por sua vez, um calcário oolítico tenderá a apresentar uma alta permeabilidade, enquanto que um

calcário silicificado terá baixa permeabilidade. A granulometria, o grau de seleção, a orientação e a estrutura de empacotamento dos grãos, a cimentação e o acamamento afetam a permeabilidade de maneira complexa (Pettijohn *et al.*, 1987). A permeabilidade definida pela equação de Darcy supõe fluxo laminar em meio poroso, mas esse fluxo laminar nem sempre é conseguido, especialmente em fluxos gasosos.

3.3 Superfície Específica

Em um meio poroso de três dimensões, chama-se superfície específica a razão $\frac{S}{V}$, onde S é a superfície de separação entre os grãos e os poros contidos em um dado volume V (Matheron, 1967). Isto é, a superfície específica é a razão entre a superfície dos poros e o volume do meio poroso. É, portanto, expressa como a recíproca do comprimento $[1/L]$.

Os valores de superfície específica podem refletir a granulometria dos sedimentos inconsolidados, não influenciados por processos de litificação e diagênese. Considerando dois volumes iguais de sedimentos inconsolidados, aquele que apresenta maior superfície específica conseqüentemente apresenta granulometria mais fina, e o de menor superfície específica, granulometria mais grossa.

Existem vários métodos para medir a superfície específica, como por exemplo métodos ópticos, métodos baseados em adsorção, métodos baseados em fluxos de fluidos, e outros (Scheidegger, 1974). Neste trabalho, utilizaremos o método indireto baseado em fluxos de fluidos em meios porosos para estimarmos a superfície específica. Este método consiste na utilização de fórmulas relacionando taxas de fluxo de fluidos através de meios porosos com suas áreas de superfície específica. São as equações de Kozeny e de Kozeny-Carman, as quais possuem diversas versões. A equação de Kozeny-Carman, que será introduzida no próximo item 3.4, é geralmente tida como indiscutível para o caso de materiais inconsolidados, e os resultados obtidos por meio desta equação são apresentados como valores finais (Scheidegger, 1974).

3.4 Equação de Kozeny-Carman

A equação de Kozeny (1927) modificada por Carman (1937), relaciona a permeabilidade de um meio poroso com a superfície específica e a porosidade. Foi

concebida apenas para fluxos em meios porosos inconsolidados, mas pode ser aplicada, também, em meios porosos consolidados, desde que sejam feitas as correções necessárias (Wyllie *et al.*, 1955). A equação básica de Kozeny-Carman pode ser escrita de forma simples como:

$$k = \frac{\phi^3}{C S_o^2 (1 - \phi)^2} \quad (10)$$

Onde C é a constante de Kozeny-Carman, S_o é a superfície específica, ϕ é a porosidade efetiva em unidades de porosidade (decimais) e k é a permeabilidade absoluta em cm^2 . Para esferas de igual diâmetro, a superfície específica S_o é função do diâmetro do grão d conforme a relação $S_o = 6/d$ (Jin *et al.* 2004). A constante C , de acordo com diversos autores (Wyllie *et al.*, 1955), (Scheidegger, 1974) e (Matheron, 1967), é igual a 5 para fluxos através de meios porosos inconsolidados.

A superfície específica por volume sólido está intimamente relacionada ao tamanho do grão: quanto mais fino o tamanho do grão, maior o valor de S_o . A equação de Kozeny-Carman mostra a dependência da permeabilidade com a porosidade efetiva, especialmente em areias inconsolidadas. Ela é útil para explicar porque areias finas ou siltes com porosidade efetiva idêntica a areias grossas apresentam permeabilidades menores: com o decréscimo da granulometria, a superfície específica cresce e conseqüentemente, crescerá a resistência ao fluxo (Pettijohn *et al.*, 1987).

Embora a equação de Kozeny-Carman funcione bem para a descrição da permeabilidade em areias uniformemente gradadas e alguns siltes, consideráveis discrepâncias são encontradas em argilas. O fator principal do insucesso da equação em solos extremamente finos é que a trama destes materiais não contém tamanhos de poros uniformes (Olsen, 1962 *apud* Mitchell, 1976). As partículas são agrupadas em agregados ou flocos que resultam em pequenos poros interagregados e grandes poros intra-agregados (Fig. 6).

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a obtenção dos valores de porosidade efetiva e permeabilidade absoluta, foram empregados métodos de medição destes parâmetros por variação de pressão em câmara confinante, utilizando o equipamento Ultra-Poro-Perm® 500 da *Core Laboratories Inc.*

Como este equipamento fora projetado para sedimentos consolidados (rochas), e também nunca havia sido utilizado tanto para rochas quanto para solos, a primeira etapa do trabalho consistiu na criação da própria rotina de operação do equipamento e preparação das amostras inconsolidadas.

A rotina de operação do equipamento, para medições de porosidade e de permeabilidade, encontra-se descrita no Anexo I.

4.1 Preparação das amostras

Devido à falta de litificação, e ao conseqüente baixo grau de coesão e consolidação dos grãos sedimentares nos solos, foi necessário encapsular a amostra, de modo a mantê-la coesa, estruturada, com volume de fácil mensuração e que não permitisse a perda de grãos para o equipamento nos ensaios, permanecendo com um volume constante.

As cápsulas são constituídas por uma lâmina de alumínio dobrada na forma de um cilindro com uma polegada de diâmetro e duas telas (60 MESH) de aço inoxidável, cortadas em forma circular, nas extremidades (Fig. 10). As amostras de solo foram postas dentro de cada cápsula, e posteriormente pesadas e medidas suas respectivas dimensões (comprimentos e diâmetros médios).

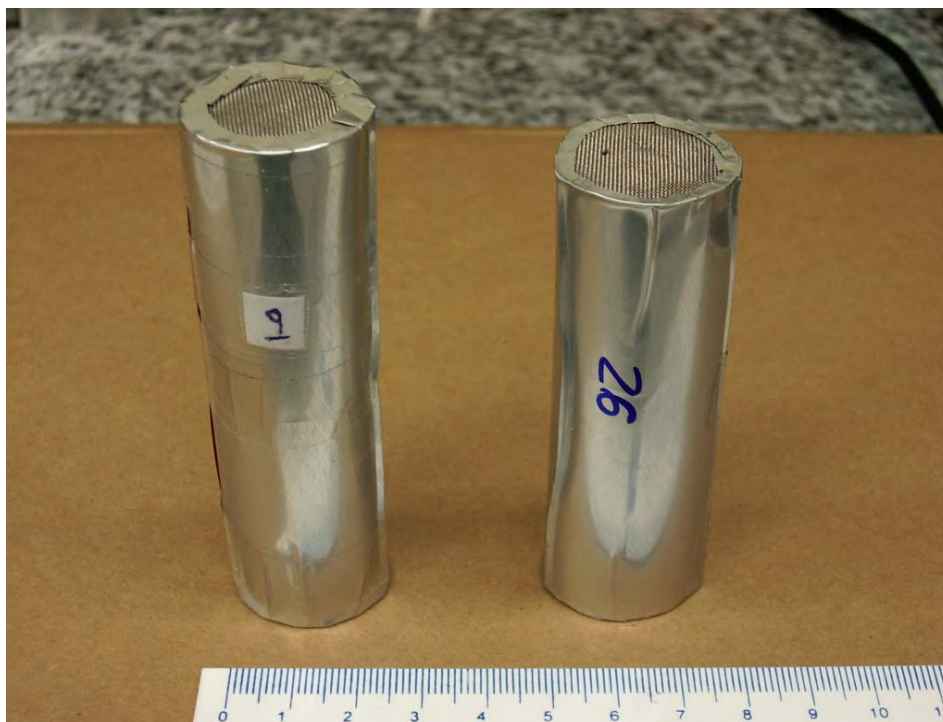


Figura 10 – Amostras inconsolidadas encapsuladas por alumínio nas laterais e telas circulares de aço inoxidável nas extremidades. Escala na foto em cm.

4.2 Estrutura do Equipamento

O UltraPoro-Perm[®] 500 é um permo-porosímetro a gás em câmara de compressão. É a combinação de um instrumento de medição de permeabilidade, um medidor de volume de poros e uma câmara simples de compressão hidrostática. Portanto, as medidas de volume de poros e permeabilidade são obtidas separadamente em equipamentos independentes, mas com o uso da mesma câmara de amostras. Os princípios de medição do porosímetro e do permeâmetro serão descritos nos próximos itens; neste, será dada atenção à câmara de compressão hidrostática simples (Fig. 11).

A câmara de compressão apresenta um cilindro de borracha interno de aproximadamente 1 polegada, dentro do qual a amostra é inserida, limitada por dois êmbolos de aço, móveis e adaptáveis ao comprimento da amostra. Este cilindro de borracha está inserido dentro de um vaso de pressão ligado a uma bomba hidráulica a óleo. O vaso de pressão pode ser submetido a uma pressão de até 10.000 psi. Porém, durante o ensaio para medição de porosidade e/ou permeabilidade, a amostra precisa estar submetida a uma pressão confinante mínima de 400 psi. Esta pressão mínima é exigida, pois se deve eliminar o espaço entre a amostra e a parede do cilindro de borracha, evitando a passagem de gás neste contato e restringindo-a apenas ao interior da amostra. A Figura 12 apresenta uma visão geral do equipamento.

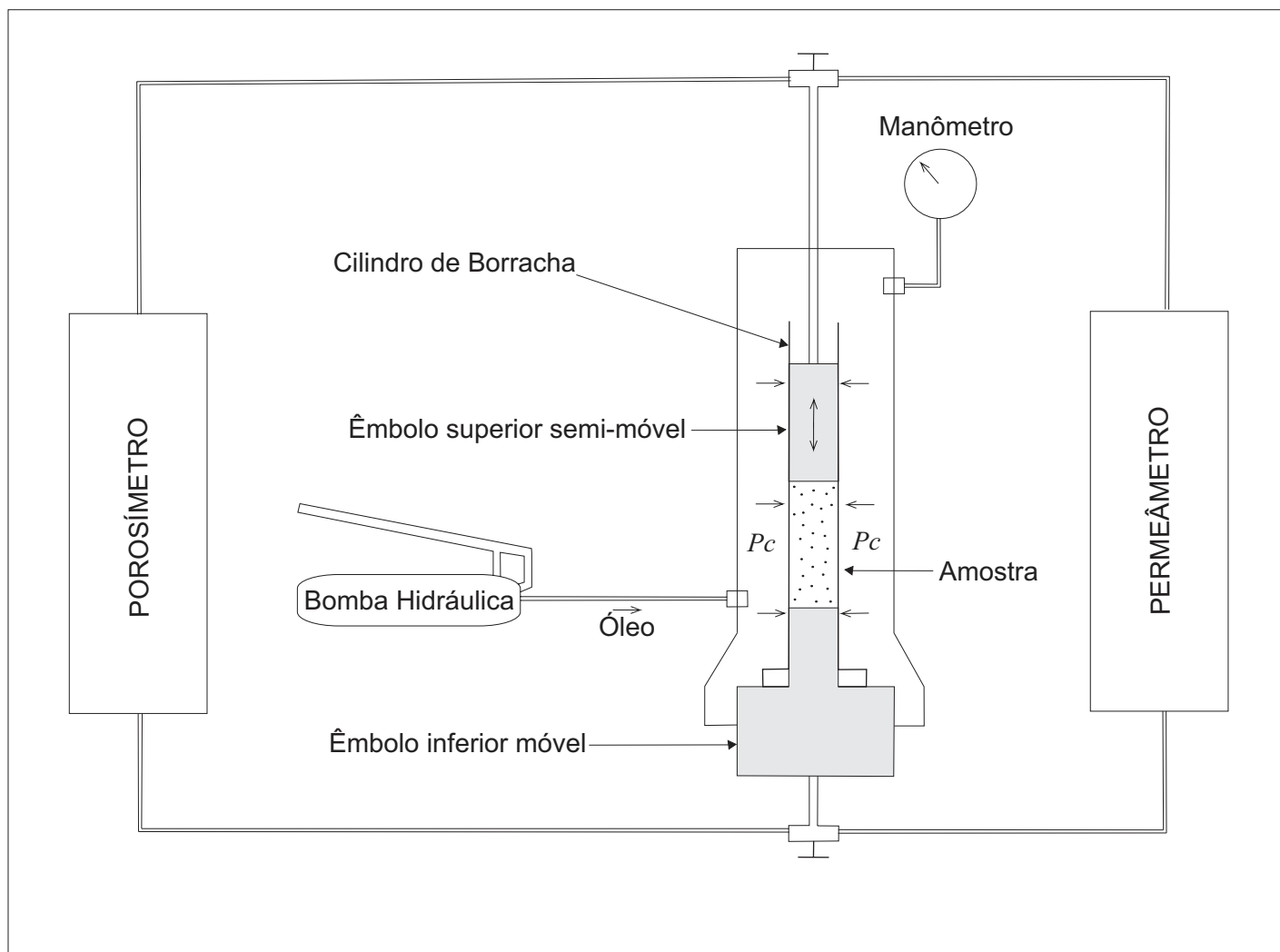


Figura 11 - Esquema geral da câmara de compressão hidrostática do permo-porosímetro. Amostra pode ser submetida a pressão confinante P_c mínima de 400 psi e máxima de 10000 psi.



Figura 12 - Fotografia do UltraPoro-Perm® 500.

4.3 Medição do Volume de Poros

O equipamento de porosidade é baseado na lei de Boyle-Mariotte, uma das leis fundamentais dos gases, que relaciona a variação de volume e pressão de um gás ideal em temperatura constante.

$$PV = cte \Rightarrow P_i V_i = P_f V_f \quad (11)$$

O porosímetro apresenta uma câmara de gás de volume constante V_1 , onde o gás nitrogênio é injetado e armazenado a uma pressão P_1 . Esta câmara de gás está ligada à câmara de compressão da amostra de volume V . Quando a câmara de compressão da amostra contém um volume de amostra V_A , ela não pode conter mais do que $V - V_A$ de volume de gás. Então, no momento em que a válvula de ligação da câmara de gás com a câmara de compressão é aberta, e o gás nitrogênio é liberado isotermicamente para penetrar na amostra, ocorre uma variação de volume ΔV e uma nova pressão P_2 é medida (Fig. 13).

$$P_1 V_1 = P_2 (V_1 + \Delta V) \quad (12)$$

onde $\Delta V = V - V_A$, ou seja, ΔV é o volume de gás na amostra, ou em outras palavras, o volume de espaços porosos na amostra em cm^3 .

4.4 Medição da Permeabilidade Absoluta

O equipamento usa a equação de Darcy, para calcular a permeabilidade a partir da taxa de fluxo medida, das pressões de injeção e saída da amostra, e do comprimento e da área da amostra.

$$k = \frac{2000 P_1 \mu Q_1 L}{(P_1^2 - P_2^2) A} \quad (13)$$

onde

k = permeabilidade absoluta (mD);

μ = viscosidade do nitrogênio (cP);

Q_1 = taxa de fluxo (cm^3/s) na pressão de injeção;

L = comprimento da amostra (cm);

A = área seção transversal da amostra (cm^2);

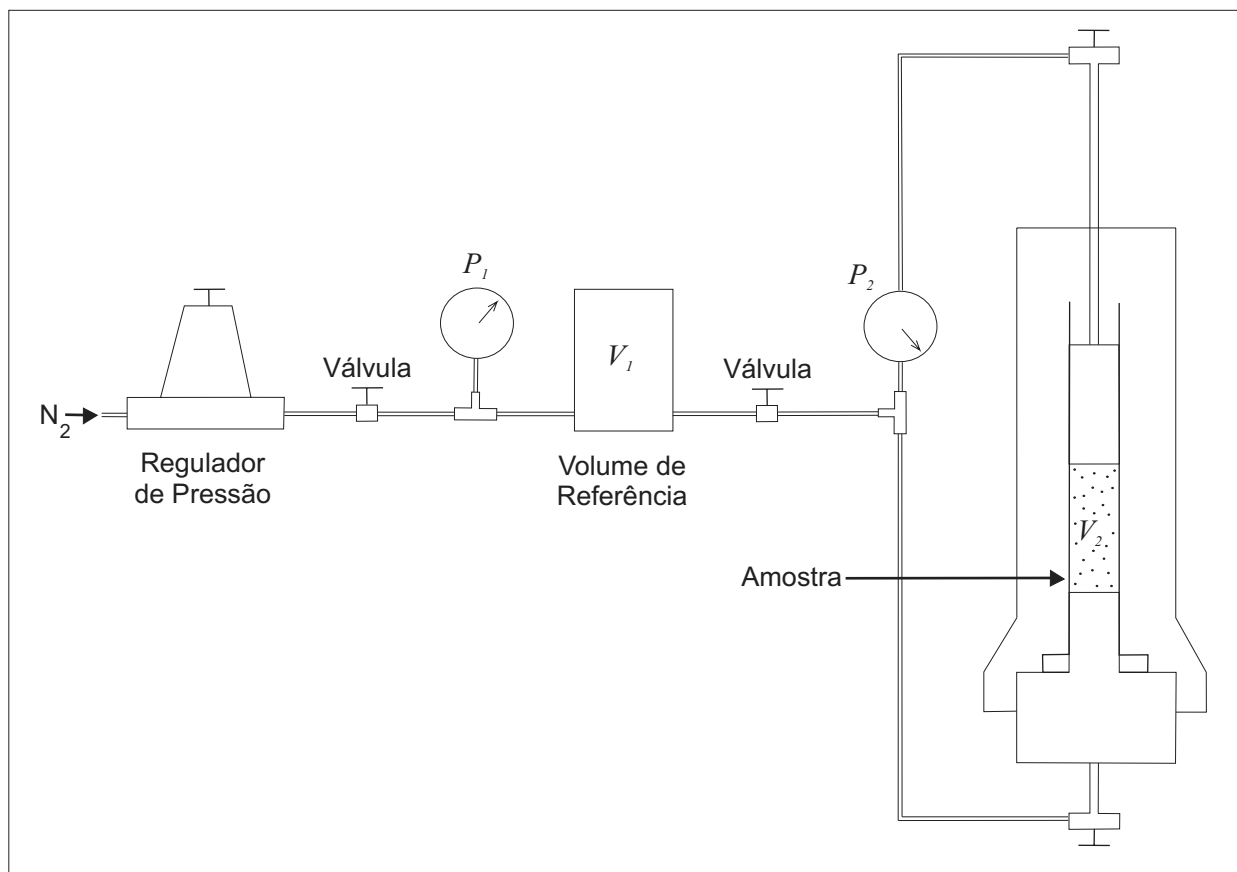


Figura 13 - Esquema de funcionamento do Porosímetro.

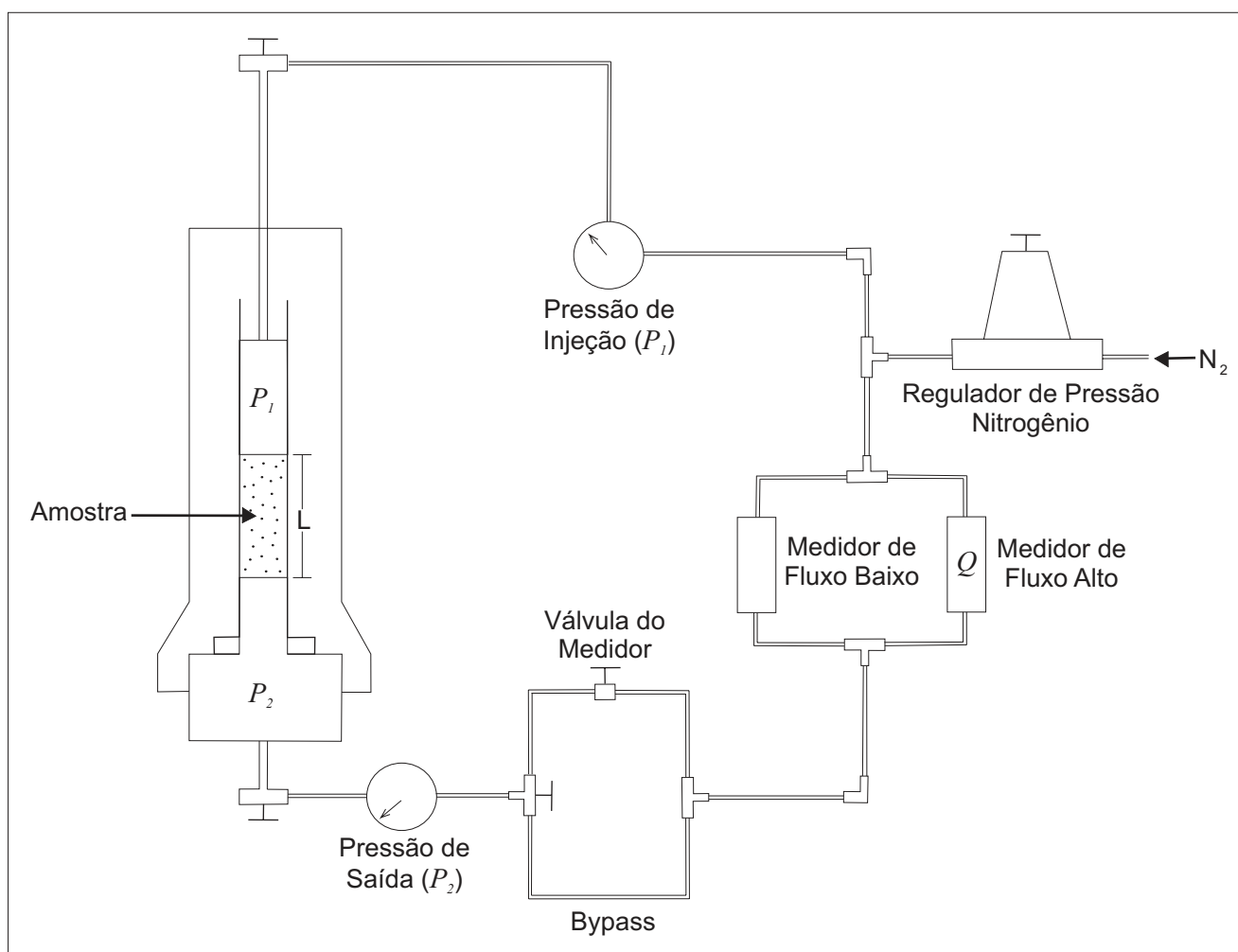


Figura 14 - Esquema de funcionamento do Permeâmetro.

P_1 = pressão de injeção (atm);

P_2 = pressão de saída (atm);

Esta equação é equivalente à equação (8) , onde a variável k está isolada e sua unidade de medida é convertida para miliDarcy (mD).

O permeâmetro (Fig. 14) a gás nitrogênio funciona com uma taxa de fluxo constante regulada conforme o tipo de amostra a ser analisada, a fim de manter um fluxo laminar.

Para se efetuar a medição de permeabilidade, é necessário que o operador forneça ao programa do UltraPoro-Perm[®] 500 o comprimento e o diâmetro da amostra.

O equipamento trabalha com uma pressão de injeção de 0 a 1,7 atm (0 a 25 psi), sendo que pressões abaixo de 0,034 atm (0,5 psi) não são recomendadas devido a desfavorável razão sinal/ruído. As pressões de injeção e saída da amostra são medidas e a diferença entre elas é calculada, fornecendo uma pressão diferencial que deve variar de no mínimo 0,0136 atm (0,2 psi) a no máximo 0,17 atm (2,5 psi).

Os dois medidores de fluxo de massa têm limites de 0,5 cm³ a 50 cm³ por minuto para a unidade de taxa de fluxo baixo e, limites de 5 cm³ a 500 cm³ por minuto para a unidade de taxa de fluxo alta. Estas taxas de fluxo podem ser reguladas por uma válvula que permite aumentar ou diminuir o fluxo antes de chegar ao medidor.

Como os sedimentos inconsolidados possuem, em geral, elevados valores de permeabilidade, todas as amostras medidas neste trabalho necessitaram de fluxos da ordem de 300 cm³ por minuto, aproximadamente, e pressões de injeção entre 2,5 e 3,0 psi, para o estabelecimento de um fluxo darciniano na amostra e uma pressão diferencial mensurável. Portanto, foi usado sempre o medidor de taxa de fluxo alta.

Assim que as exigências de valores limites de pressão de injeção, de pressão diferencial e de taxa de fluxo são cumpridas, os valores de permeabilidade são calculados automaticamente pelo programa e, ao atingirem uma estabilidade, são armazenados pelo mesmo.

4.5 Cálculo da massa específica

A massa específica é a relação da massa de uma substância pelo seu volume numa dada temperatura. É sinônimo de massa volumar e, em inglês, é chamada de *density*.

Neste trabalho a massa específica foi calculada a partir da massa da amostra seca medida em balança digital e do volume das cápsulas utilizadas para cada amostra, onde se mediu o comprimento e diâmetro das cápsulas com paquímetro digital.

A unidade utilizada para a massa específica foi o grama por centímetro cúbico (g/cm^3).

O valor de massa específica é referente ao valor do volume total (*bulk density* - ρ_b), ou seja, é o somatório da densidade da matriz (*matrix density* - ρ_m) mais a densidade do fluido nos poros (*fluid density* - ρ_f), conforme a equação:

$$\rho_b = \rho_m (1 - \phi) + \rho_f \phi \quad (14)$$

4.6 Cálculo da superfície específica

A superfície específica foi calculada com base nos resultados de porosidade e permeabilidade obtidos, utilizando a equação de Kozeny-Carman (Equação 10). Conforme sugerido por Wyllie *et al.* (1955), Scheidegger (1974) e Matheron (1967), considerou-se a constante C de Kozeny-Carman igual a 5.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram obtidos, por medição direta no permo-porosímetro à pressão constante de 400 psi, valores de porosidade efetiva e de permeabilidade absoluta para as 31 amostras descritas no item 2.3. A partir desses dados foram calculadas, pela equação de Kozeny-Carman, suas respectivas superfícies específicas. Também foram calculados os respectivos valores de massa específica (Tabela 1 e Tabela 2, Anexo II).

Todos estes resultados foram comparados com teores de finos (argila + silte) obtidos por Salgueiro (*no prelo*) através do ensaio de análise granulométrica, conforme Norma DNER-ME 051/94 (Tabela 3, Anexo II)

Por fim, foram escolhidas três amostras, com valores de permeabilidade marcadamente distintos, onde foram registrados os valores de permeabilidade e porosidade sob seis níveis crescentes de pressão confinante (Tabela 4, Anexo II).

5.1 Parâmetros obtidos diretamente

5.1.1 POROSIDADE ESPECÍFICA

A partir dos resultados de volume de poros obtidos pelo equipamento se calculou a porosidade em percentagem a partir da equação (1). Esta porosidade é mostrada na figura 15 em função da profundidade e comparada ao perfil geológico obtido dos poços.

Percebe-se que a porosidade nos primeiros 0,75m de perfil apresenta uma porosidade média mais baixa, em torno de 35,5% e está associada às camadas mais escuras e com raízes, solos com matéria orgânica.

Após o primeiro metro de profundidade, a porosidade, em média, passa para aproximadamente 37%, o que é mais evidente no poço SD-03.

5.1.2 PERMEABILIDADE ABSOLUTA

O resultado da permeabilidade absoluta proveio diretamente de medições no equipamento baseadas na equação (13). Estes valores de permeabilidade foram plotados em função da profundidade e comparados ao perfil geológico correspondente (Fig. 16). Percebe-se em ambos os poços uma correlação entre o tipo do material sedimentar e o comportamento da permeabilidade.

O poço SD-02 apresenta o primeiro meio metro com permeabilidades de 5000 mD em média, e estão associadas aos sedimentos finos cinzas com matéria orgânica superficial. Entre 0,5m a 1,25m, a permeabilidade aumenta abruptamente para 9500 mD, coincidindo com a camada de raízes mais grosseiras e escassas (Amostra 3 - Fig. 4), responsáveis provavelmente por este aumento. Após esta camada, os sedimentos são mais bem selecionados e a permeabilidade fica, em média, estabilizada em 5500 mD.

O poço SD-03 apresenta comportamento de permeabilidade distinto do poço SD-02. Seu primeiro meio metro mostra permeabilidades mais altas, em média 7300 mD. De 0,5m até 1,5m, a permeabilidade decresce até atingir 3600 mD, correspondendo a um nível de areia fina mal selecionada (Amostra 6 - Fig. 4). De 1,5m a 2,0m, a permeabilidade cresce até atingir seu valor máximo de 8700 mD, referente à amostra 9, coincidindo com o nível d'água do lençol freático. Após este nível, a permeabilidade se estabiliza em média de 7500 mD.

5.1.3 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados do cálculo das massas específicas foram obtidos através de medições das massas das amostras secas e dos comprimentos e diâmetros das amostras encapsuladas (Tabela 1, Anexo II). As massas específicas foram plotadas em função da profundidade e acompanhadas de seus respectivos perfis geológicos (Fig. 17).

Os valores médios de massa específica a partir da amostra 6 no poço SD-03 são em média $1,5 \text{ g/cm}^3$, mostrando que abaixo desta amostra os sedimentos se tornam mineralogicamente maduros, compostos quase totalmente por quartzo. Esta conclusão baseia-se na aplicação da equação 14 para amostras secas e no resultado médio da porosidade neste intervalo:

$$\rho \cong 2,65(1 - 0,38) + 0 \cong 1,6, \text{ onde } 2,65 \text{ é a massa específica do quartzo em } \text{g/cm}^3.$$

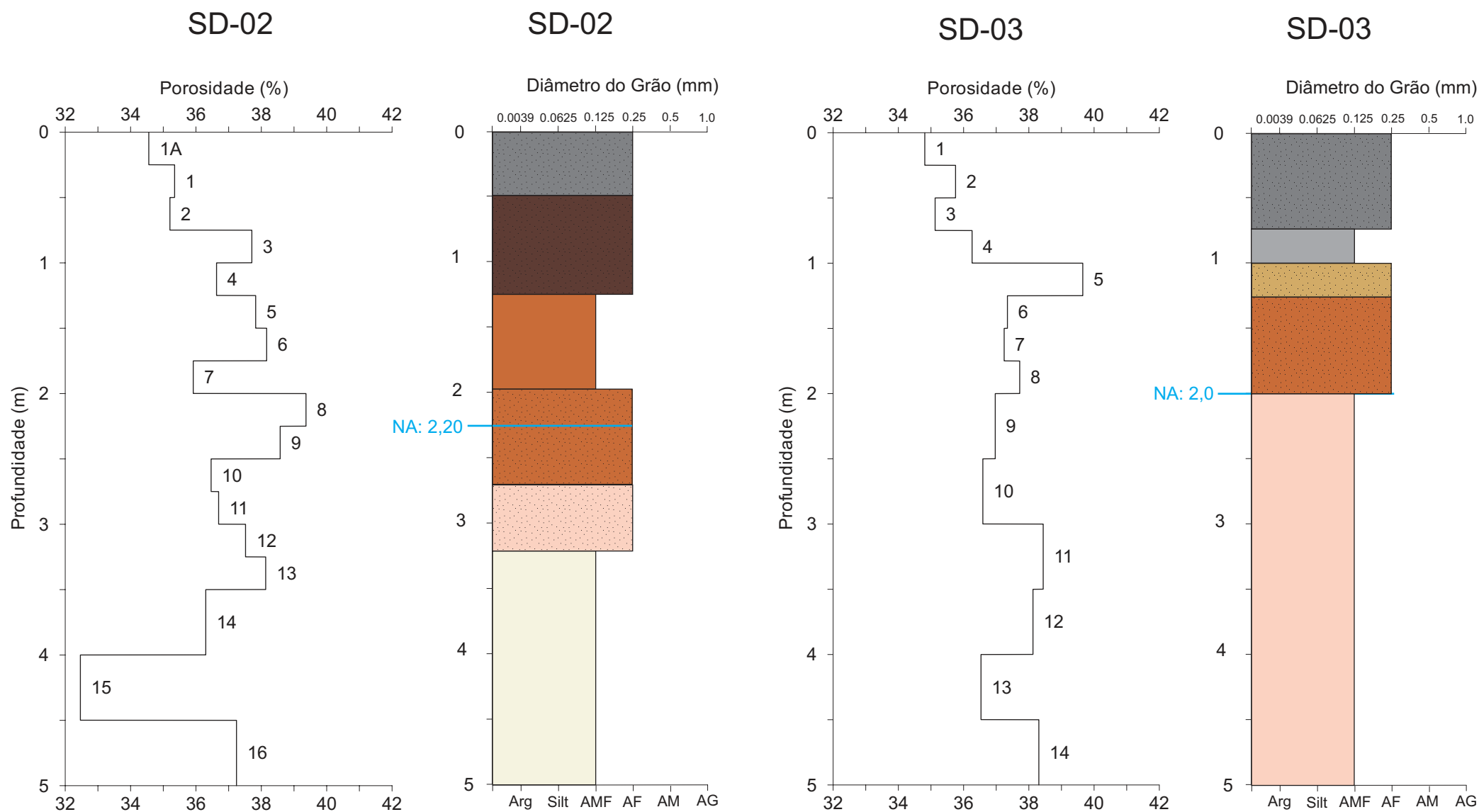


Figura 15 - Perfis de porosidade efetiva e perfis geológicos dos poços SD-02 e SD-03. Os números junto ao perfil de porosidade indicam os números das amostras.

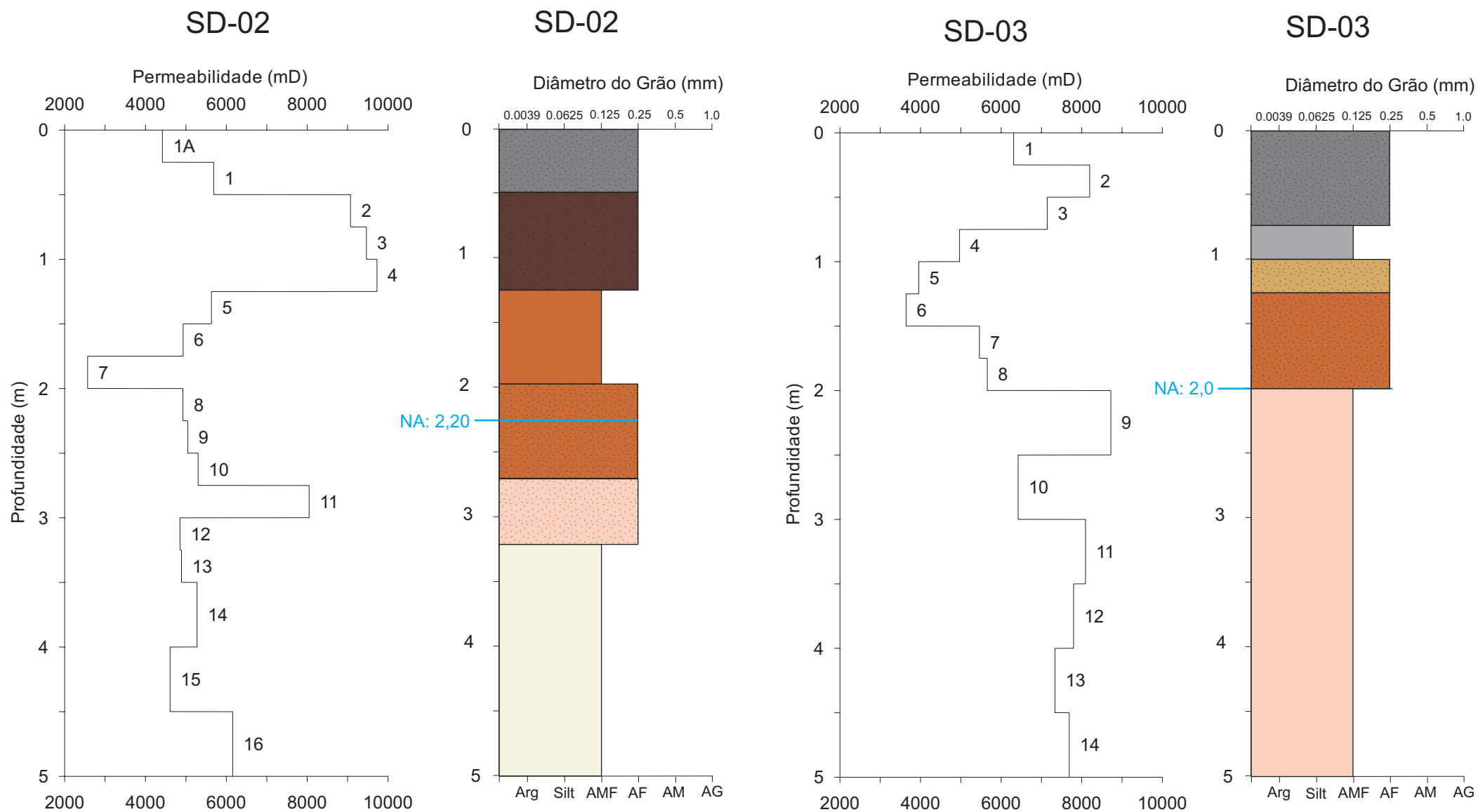


Figura 16 - Perfis de permeabilidade absoluta e perfis geológicos dos poços SD-02 e SD-03. Os números junto ao perfil de permeabilidade indicam os números das amostras.

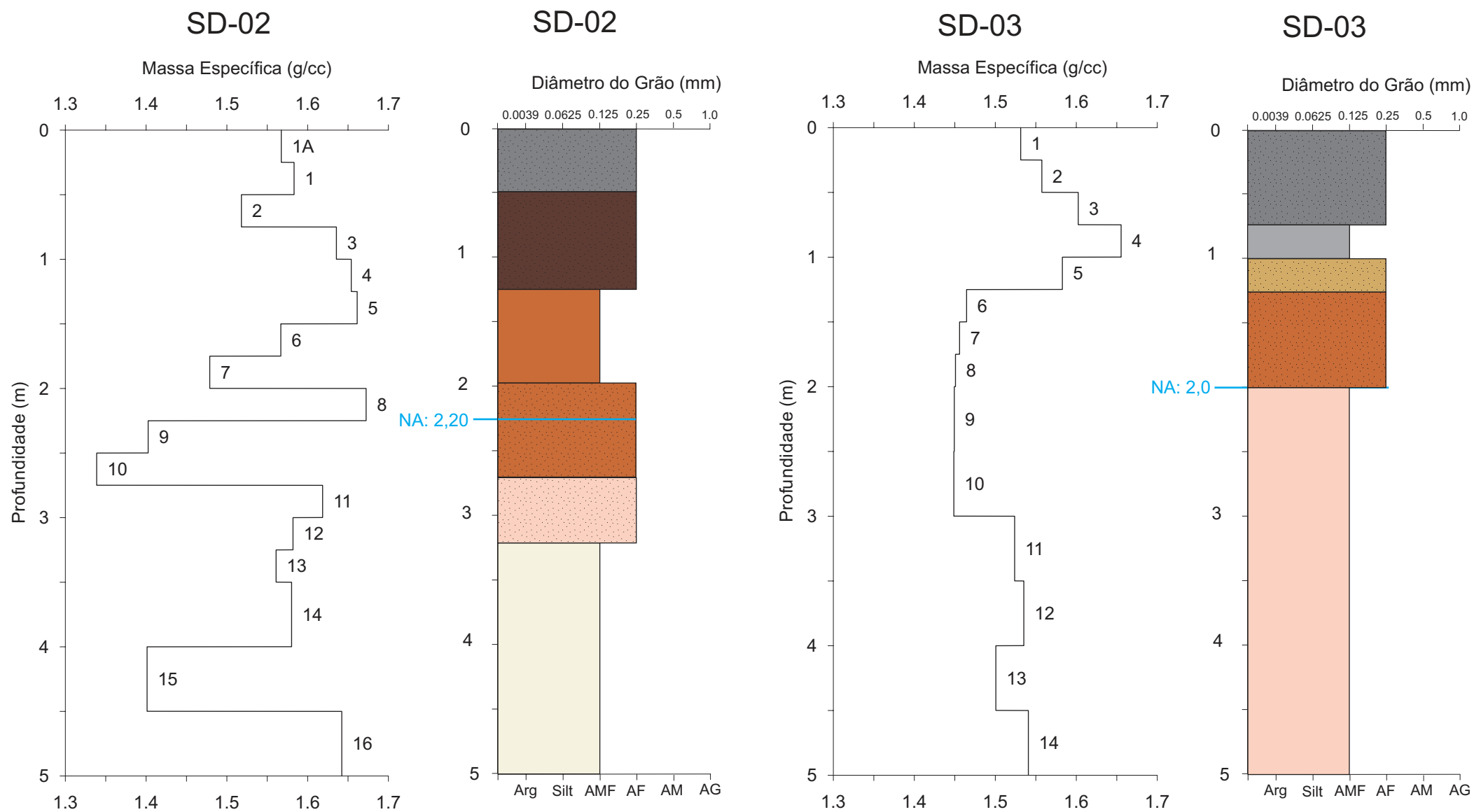


Figura 17 - Perfis da massa específica e perfis geológicos dos poços SD-02 e SD-03. Os números junto ao perfil de massa específica indicam os números das amostras.

5.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS DIRETAMENTE.

Os resultados de porosidade, permeabilidade e massa específica foram comparados entre si, com objetivo de estabelecimento de alguma relação entre estas propriedades.

No gráfico 1 estão plotados os valores de permeabilidade e porosidade das amostras. Não se observou qualquer relação nítida nestes sedimentos inconsolidados.

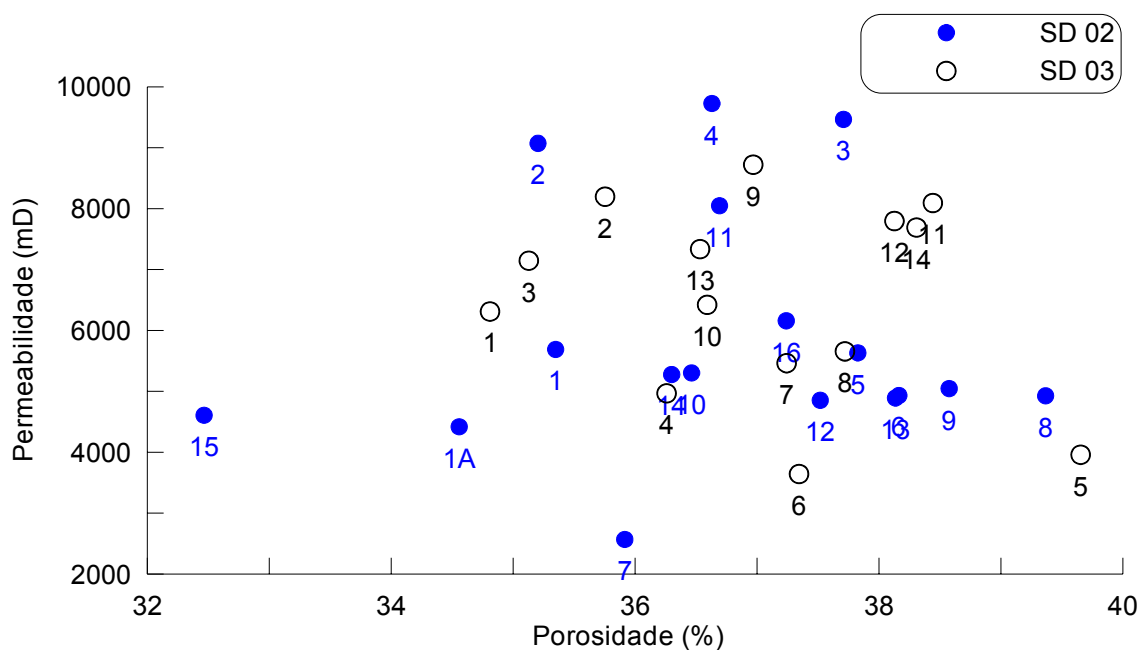
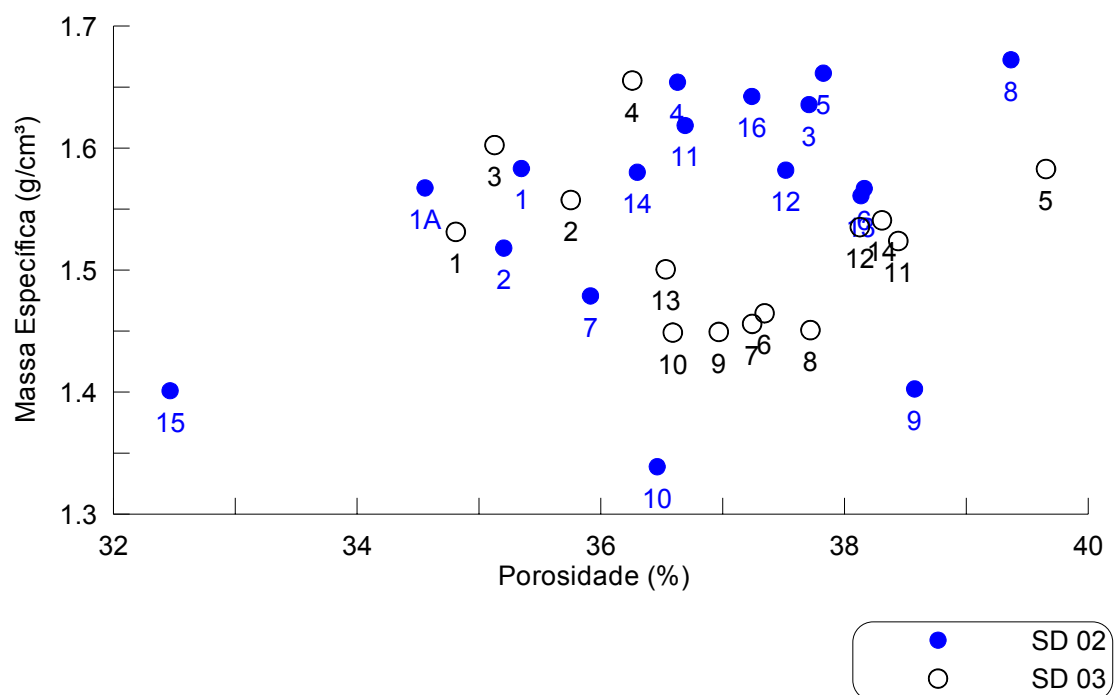


Gráfico 1 – Relação da porosidade com a permeabilidade.

A porosidade foi comparada com a massa específica no Gráfico 2a. Podemos perceber que não há uma tendência clara de comportamento entre os parâmetros, mas há uma leve concentração de porosidades entre 35% a 38% e massas específicas entre $1,45\text{g/cm}^3$ e $1,7\text{g/cm}^3$.

A massa específica também foi comparada à permeabilidade (Gráfico 2b), mas apresentou um padrão de dispersão grande, não podendo estabelecer uma tendência característica.

a)



b)

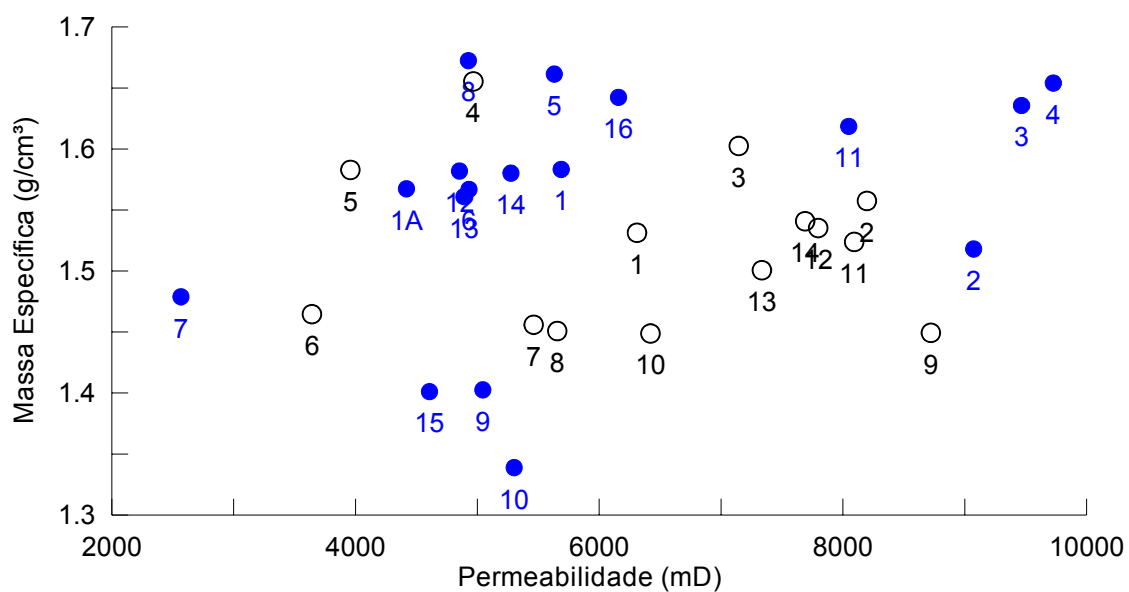


Gráfico 2 – a) Relação da porosidade com massa específica. b) Relação permeabilidade com massa específica.

5.2 Superfície específica estimada

Após as medições diretas, foram obtidos, a partir de cálculos matemáticos realizados sobre estas medições, os parâmetros de superfície específica, calculados conforme o item 4.6.

Estes resultados foram plotados em função da porosidade e permeabilidade, conforme os Gráficos 3a e 3b.

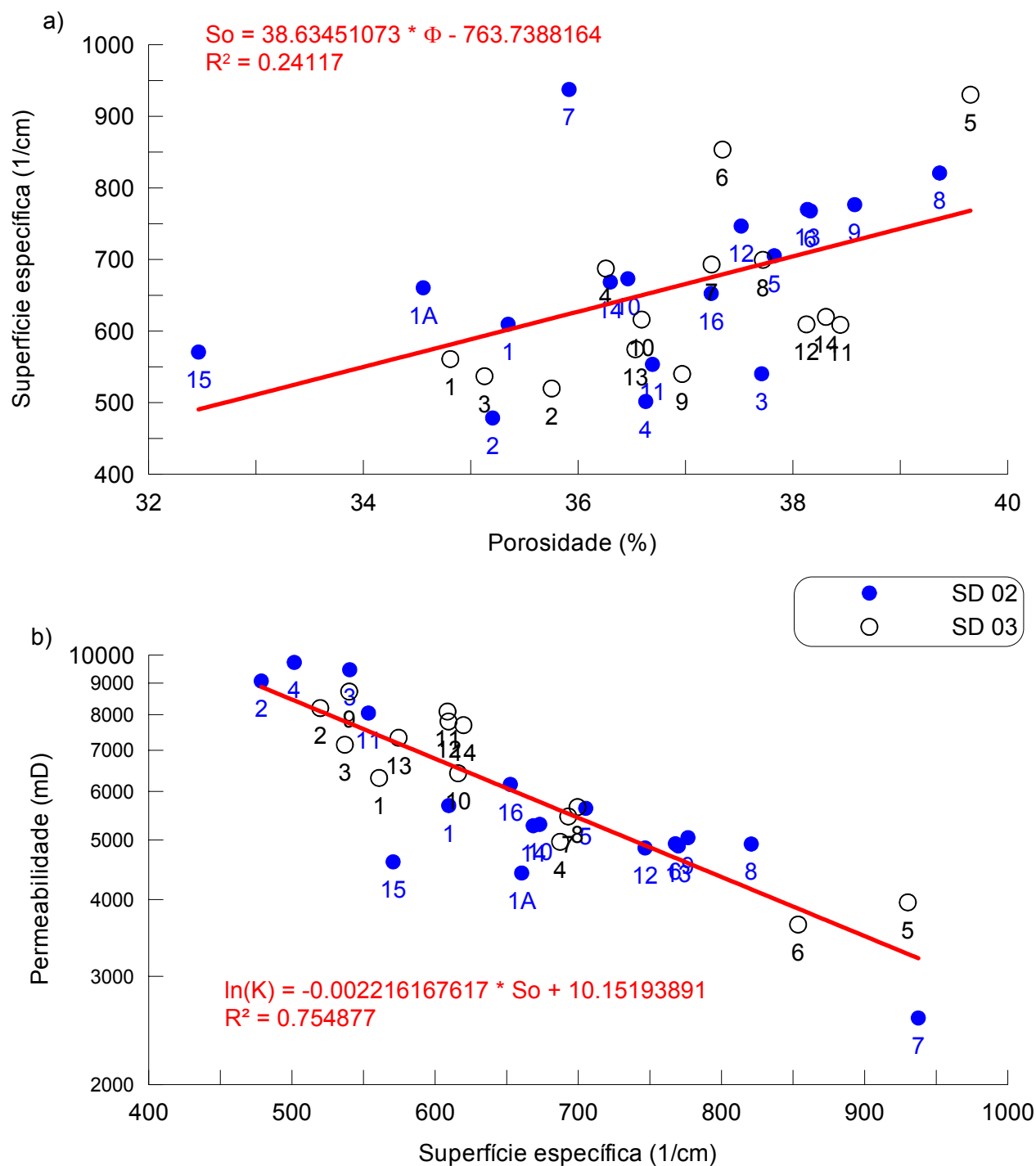


Gráfico 3 – a) Relação da porosidade com a superfície específica. b) Relação da permeabilidade com a superfície específica.

Observa-se a partir do Gráfico 3a, que superfícies específicas mais baixas apresentam porosidades menores, enquanto superfícies específicas mais altas estão associadas a porosidades maiores, estabelecendo-se uma relação diretamente proporcional, ou com uma tendência para este aspecto.

Ao compararmos permeabilidade com superfície específica (Gráfico 3b), notamos que superfícies específicas menores apresentam permeabilidades maiores, enquanto sedimentos com superfícies específicas maiores apresentam porosidades menores, estabelecendo-se uma clara relação inversamente proporcional.

Estes dois Gráficos (3a e 3b), corroboram a observação de que sedimentos finos podem apresentar altas porosidades, mas baixas permeabilidades.

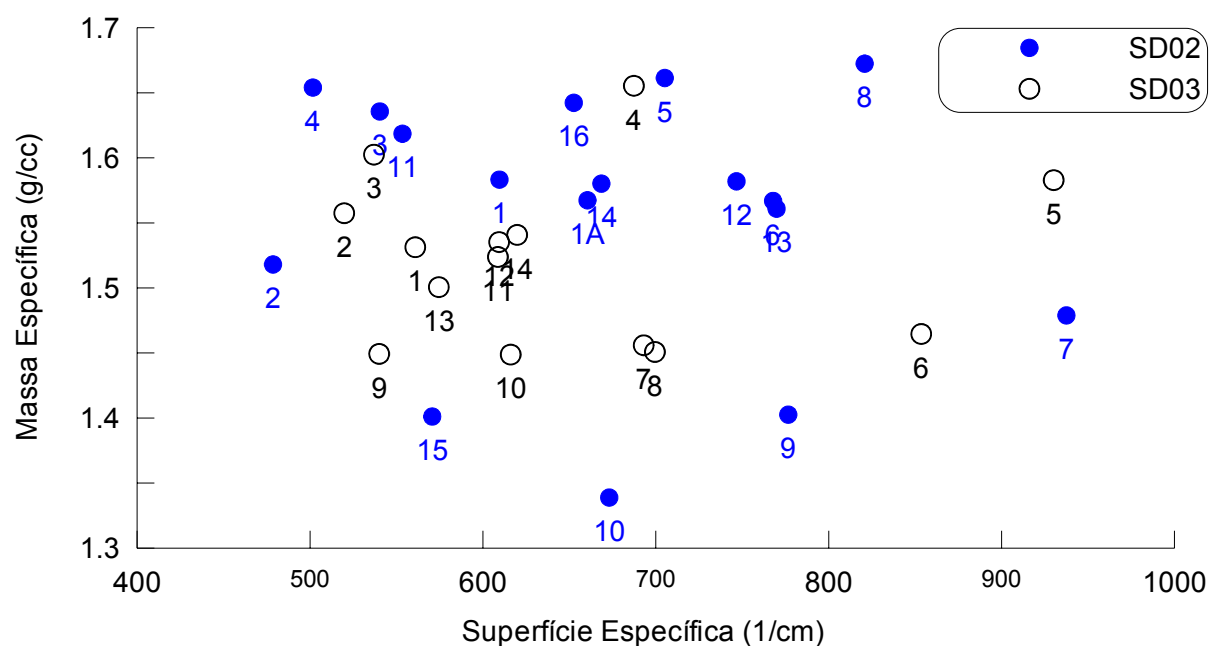


Gráfico 4 – Relação da massa específica com a superfície específica.

A partir da comparação dos resultados de massa específica com as superfícies específicas (Gráfico 4), obteve-se uma nuvem de dispersão, mostrando que não há um comportamento previsível da superfície específica em relação à massa específica.

5.3 Comparação com dados externos

Análises granulométricas para teor de silte mais argila, foram efetuadas nestas amostras por Salgueiro (*no prelo*). Os resultados dos teores de silte e argila foram plotados em função dos dados de superfície específica obtidos neste trabalho (Gráfico 5).

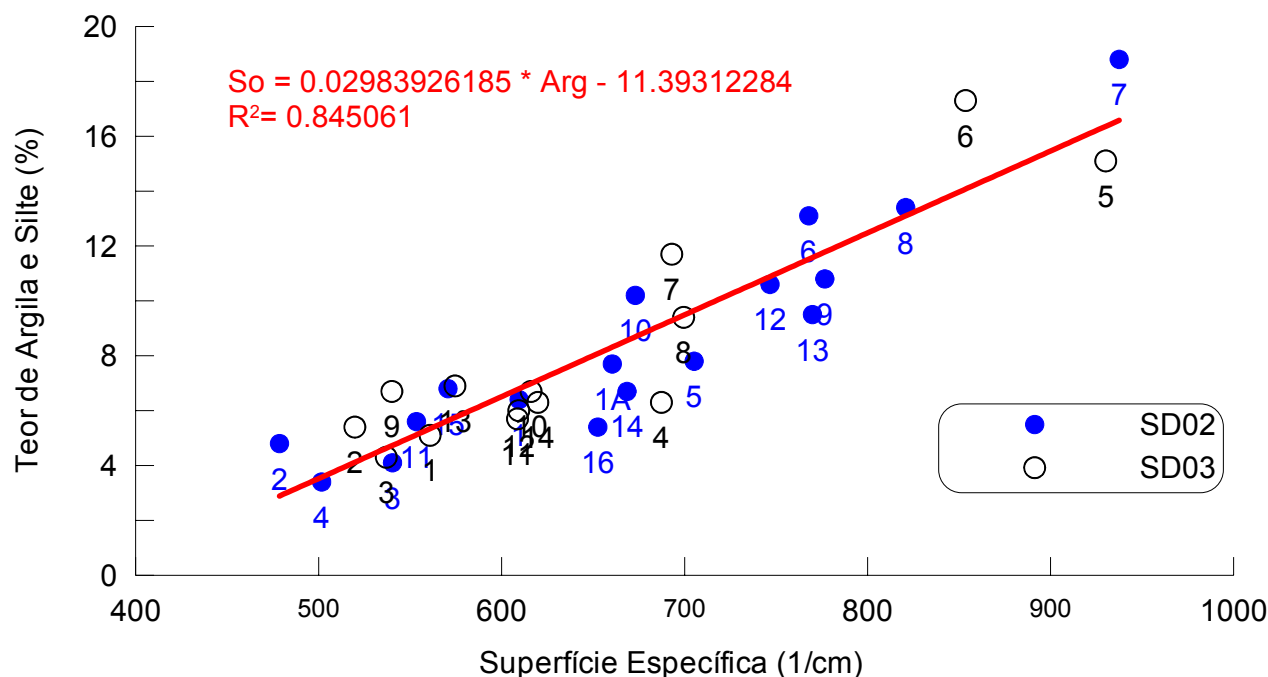


Gráfico 5 – Relação do teor de argila com a superfície específica.

O gráfico 5 mostra uma visível tendência crescente, relacionando baixos teores de argila e silte a baixos valores de superfície específica, e altos teores de argila e silte com altos valores de superfície específica.

Este resultado é bastante satisfatório, pois corrobora a teoria de que os sedimentos de granulometria mais fina, apresentam maiores valores de superfície específica. Por exemplo, a amostra 6 do poço SD-03 apresenta 18% de teor de argila e silte e valores de superfície específica de 850cm^{-1} que refletem a relevante presença de grãos finos nestes sedimentos arenosos.

5.4 Perfis comparativos finais

Com os dados de permeabilidade, superfície específica e teor de argila e silte das amostras, foram montados perfis compostos correlacionando dois destes parâmetros ao perfil geológico correspondente (Fig. 18, 19 e 20).

Na Figura 18 foram comparados resultados de permeabilidade e superfície específica. Percebe-se que o comportamento do perfil de superfície específica é quase espelhar o perfil de permeabilidade. Mais uma vez observa-se que baixas permeabilidades são acompanhadas de altos valores de superfície específica, ou ainda que altos valores de superfície específica indicam maiores concentrações de finos nos sedimentos.

Na figura 19, o perfil de permeabilidade é comparado ao perfil de teor de argila e silte. Também percebemos um comportamento oposto entre estes perfis. Permeabilidades mais baixas apresentam maiores teores de argila e silte e vice-versa. Estes resultados sugerem que as permeabilidades foram medidas com sucesso, já que o método empregado para obtenção deste parâmetro não tem relação direta com o método usado para medir os teores de argila e silte.

Por fim, na Figura 20, foi comparado o perfil de teores de argila e silte com o perfil de superfície específica. Nota-se um comportamento muito semelhante ao da comparação entre o perfil de finos (argila e silte) com o perfil de superfície específica. Isto indica que realmente a superfície específica reflete, de forma qualitativa, a variação granulométrica nos sedimentos.

Um fato que se deve ressaltar é que as medidas de permeabilidade e superfície específica foram obtidas pelo método apresentado neste trabalho, enquanto os teores de argila e silte foram obtidos pelo método de análise granulométrica do DNER. Sendo assim, a sua comparação é relevante, já que os dois métodos empregados apresentam limitações diferentes e os possíveis erros estão associados a diferentes variáveis.

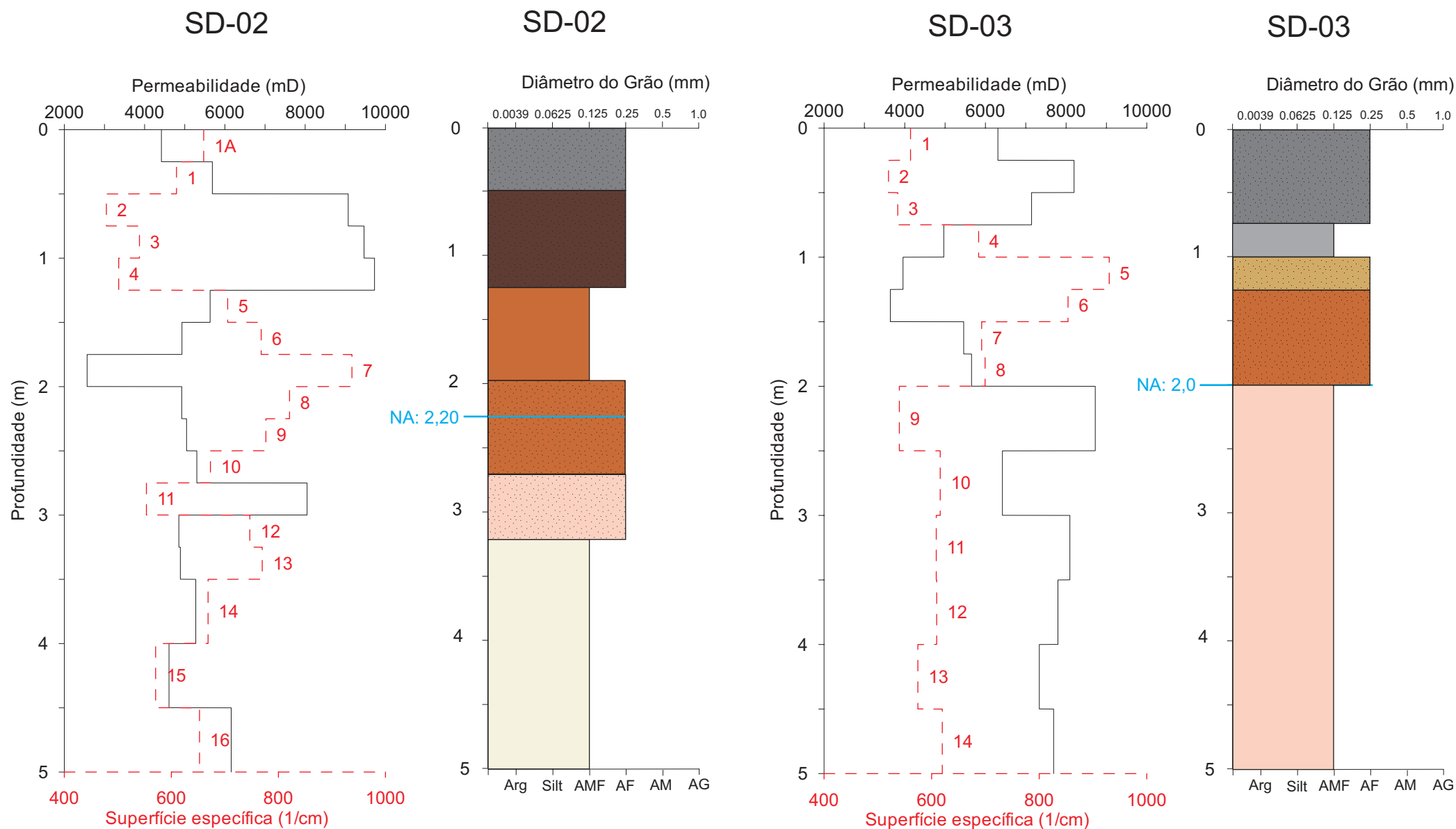


Figura 18 - Perfil composto de permeabilidade e superfície específica e perfil geológico do poços. Os números junto ao perfil de superfície específica indicam os números das amostras.

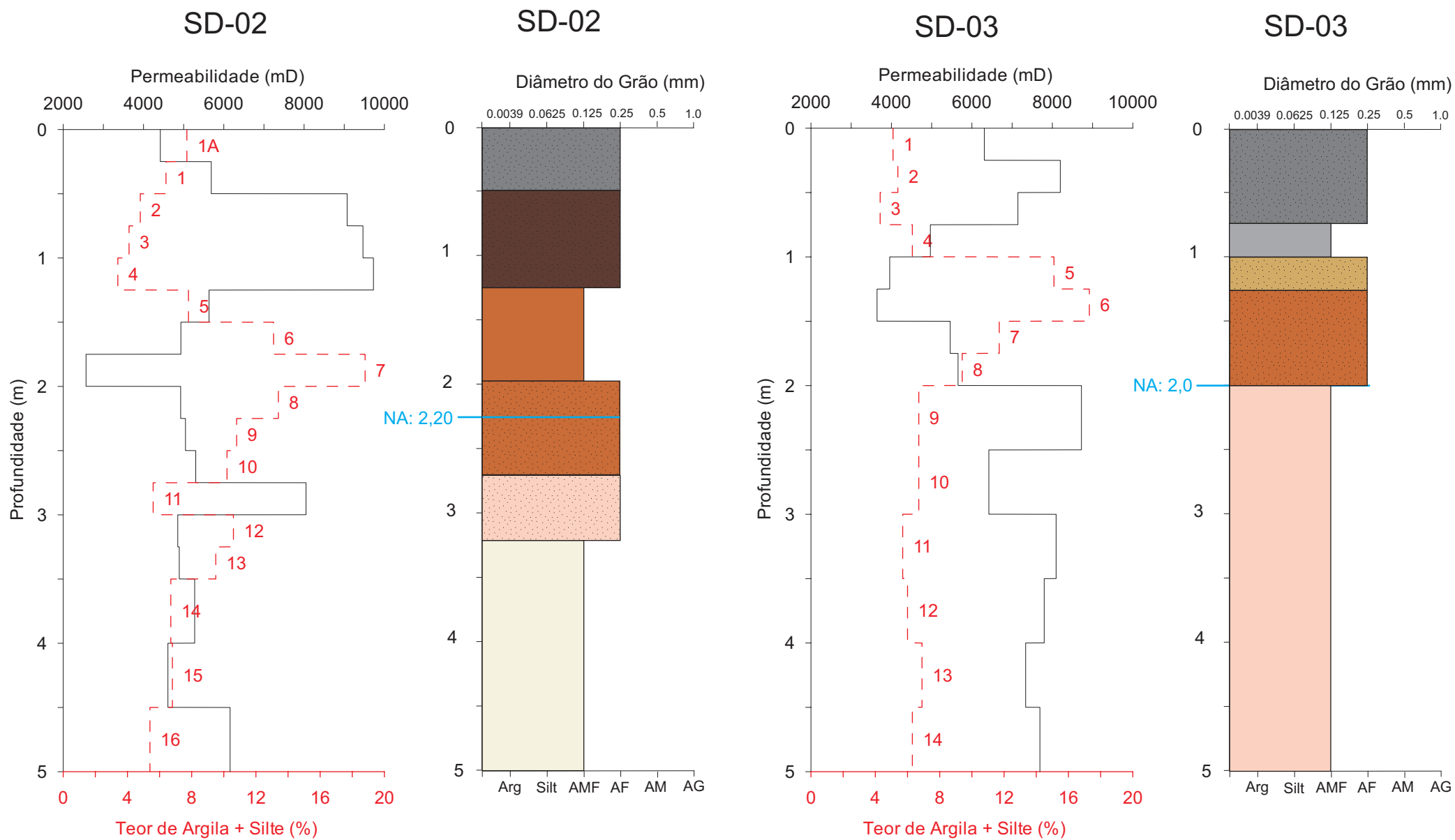


Figura 19 - Perfil composto de permeabilidade e teor de silte+argila e perfil geológico dos poços SD-02 e SD-03. Os números junto ao perfil do teor de silte+argila indicam os números das amostras.

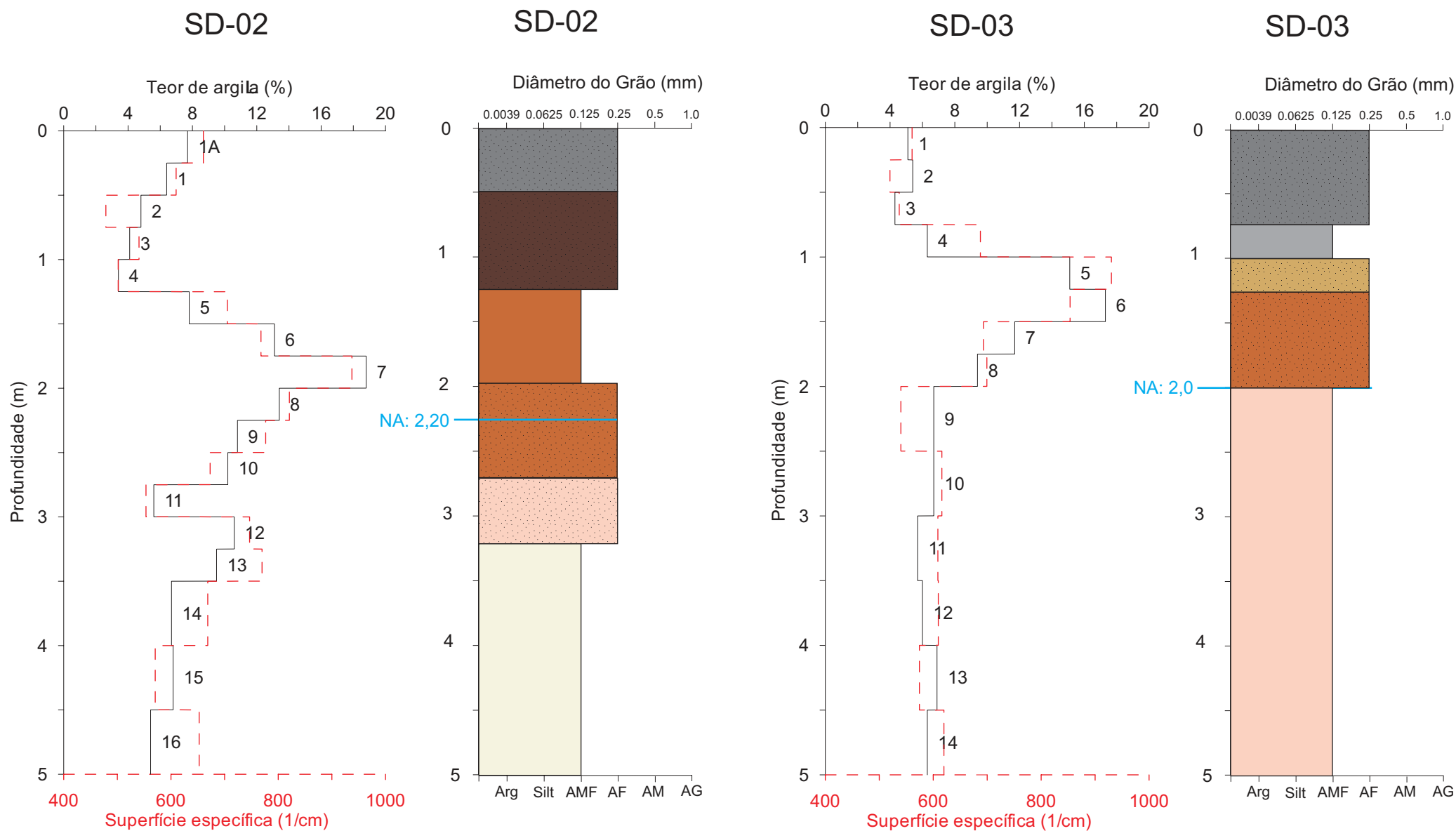


Figura 20 - Perfil composto do teor de silte+argila e superfície específica e perfil geológico dos poços SD-02 e SD-03. Os números junto ao perfil do teor de silte+argila indicam os números das amostras.

5.5 Análise do efeito da pressão sobre a porosidade e a permeabilidade

Como o equipamento exige uma pressão confinante mínima (400 psi) para medição do volume de poros e permeabilidade absoluta, e os sedimentos inconsolidados foram coletados em condição ambiente (14,7 psi), tornou-se relevante o estudo do efeito da variação de pressão sobre a porosidade e permeabilidade. Este estudo teve como objetivo modelar quais seriam os valores de permeabilidade e porosidade em condição ambiente para os sedimentos inconsolidados, e avaliar o grau de discrepância destas medidas com as medidas feitas em pressão confinante mínima. Esta pressão confinante mínima é exigida pelo equipamento a fim de evitar que ocorra fluxo de gás entre a amostra e a parede da câmara de confinamento. Por outro lado, o confinamento é exigido especialmente no caso de medição das propriedades do meio poroso de rochas testemunhadas sob grandes profundidades.

Três amostras foram escolhidas para os estudos de variação de pressão com base em valores de: permeabilidade baixa, amostra 7 do poço SD-02 (2567mD); permeabilidade alta, amostra 4 do poço SD-02 (9727mD); e permeabilidade moderada, amostra 10 do poço SD-03 (6421mD).

Para cada amostra, os valores de porosidade e permeabilidade foram medidos em seis pressões confinantes diferentes, 400, 500, 750, 1000, 1500 e 2000psi. Com os resultados foram confeccionados gráficos nos quais ajustou-se uma curva com o melhor coeficiente de determinação r^2 .

5.5.1 EFEITO DA PRESSÃO SOBRE A POROSIDADE

Pela análise do Gráfico 6, a porosidade da amostra 7 do poço SD-02 em pressão ambiente (14,7psi) seria de 39,27% enquanto a porosidade em pressão confinante mínima (400psi) é de 35,9%. Disto resulta um erro absoluto de 3,37% e um erro relativo de 8,6% nas medidas obtidas sob 400psi como se fossem obtidas em pressão ambiente.

Para a amostra 4 do poço SD-02, o valor de porosidade a pressão ambiente seria de 37,87%, enquanto sob pressão confinante mínima é de 36,65%. O erro absoluto é de 1,22% e o erro relativo de 3,22%.

A porosidade da amostra 10 do poço SD-03, na pressão ambiente, seria de 38,42% e a porosidade em pressão confinante mínima é de 36,6%, mostrando um erro absoluto de 1,82% e um erro relativo de 4,7%

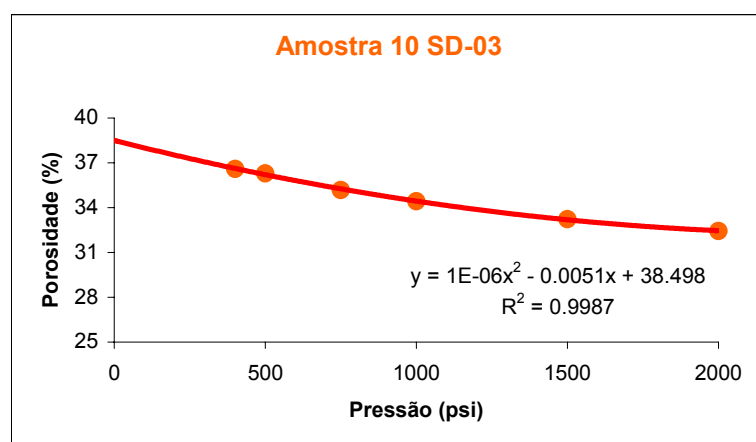
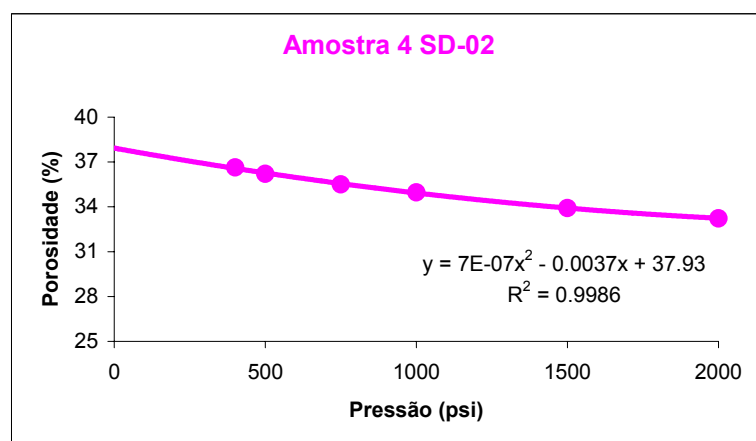
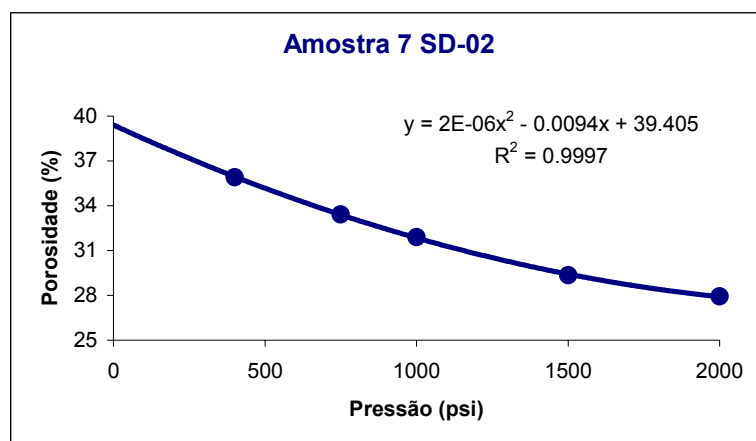


Gráfico 6 – Curvas ajustadas aos dados de porosidade com a variação de pressão. Onde $f(x)$ é a função matemática de melhor ajuste da curva e r^2 é o coeficiente de determinação.

5.5.2 EFEITO DA PRESSÃO SOBRE A PERMEABILIDADE

A análise semelhante à que foi feita para porosidade também foi feita para os dados de permeabilidade. Os resultados estão expressos nos Gráficos 7a e 7b.

Para a amostra 7 do poço SD-02 foi ajustada uma curva de função polinomial de segunda ordem. A permeabilidade a pressão ambiente seria de 3553 mD, enquanto a permeabilidade a pressão mínima confinante é de 2567 mD. Disto resultou um erro absoluto de 986 mD e um erro relativo de 27,7%. Observa-se que não é possível ajustar de forma eficiente os valores medidos por uma função suave. Isto sugere um provável problema de ordem experimental com essa amostra.

A amostra 4 do poço SD-02 foi ajustada por uma curva polinomial de terceira ordem. Esta amostra apresentaria uma permeabilidade, na pressão ambiente, de 10750 mD, enquanto sua permeabilidade na pressão confinante mínima é de 9727 mD. O erro absoluto é de 1023 mD e o erro relativo de 9,5%.

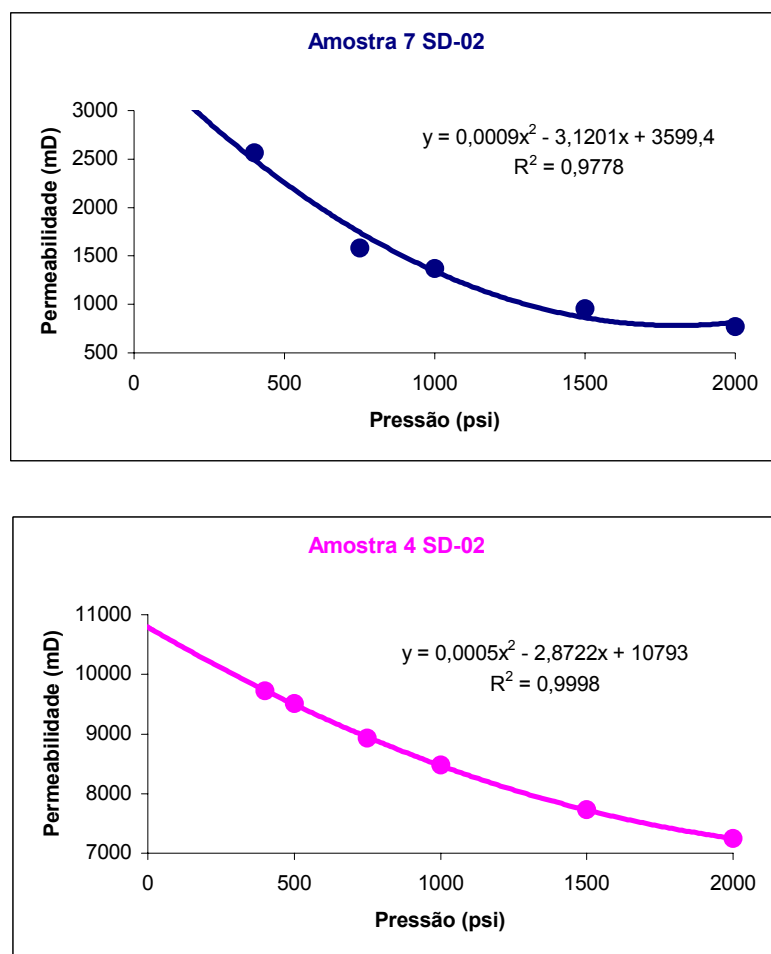


Gráfico 7a - Curvas ajustadas aos dados de permeabilidade com a variação de pressão. Onde $f(x)$ é a função matemática de melhor ajuste da curva e r^2 é o coeficiente de determinação.

Para a amostra 10 do poço SD-03 também se ajustou uma curva polinomial de terceira ordem. Esta amostra apresentaria, em pressão atmosférica, permeabilidade de 7417 mD, enquanto sob pressão confinante mínima o valor de permeabilidade é de 6421 mD. Seu erro absoluto é de 996 mD e o erro relativo de 13,4%.

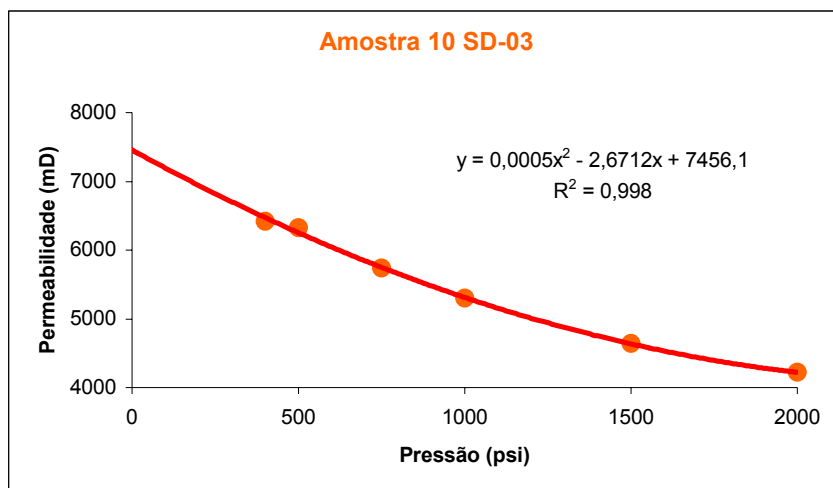


Gráfico 7b - Curvas ajustadas aos dados de permeabilidade com a variação de pressão. Onde $f(x)$ é a função matemática de melhor ajuste da curva e r^2 é o coeficiente de determinação.

5.5.3 RESUMO

No Gráfico 8 são apresentadas as três curvas das amostras Am4 – SD2, Am7 – SD2 e Am10 –SD3. Pela análise deste gráfico, se percebe que a maior variação de porosidade em função da pressão confinante vem da Am7 –SD2, a qual apresenta o maior erro relativo, sendo também a amostra com maior teor de argila e silte.

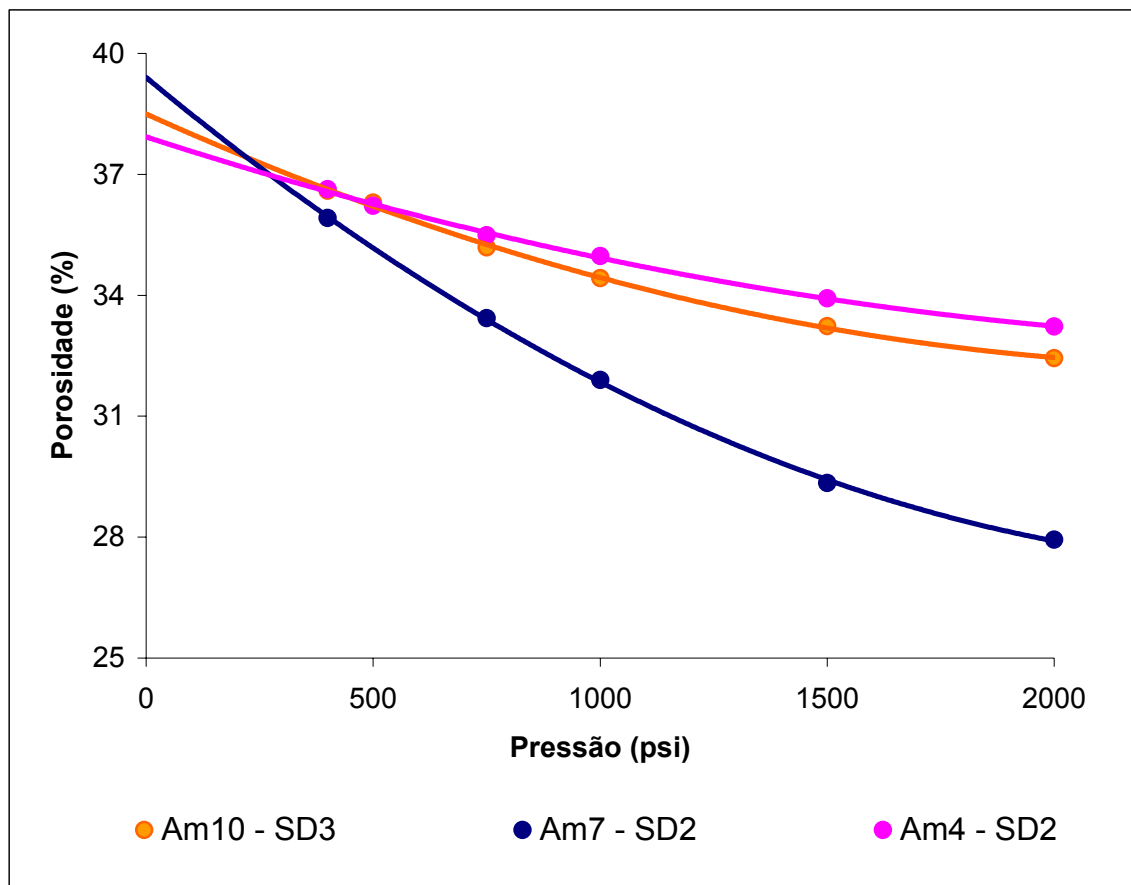


Gráfico 8 – Curvas de comportamento da porosidade em função da pressão, para as amostras inconsolidadas selecionadas.

As curvas de permeabilidade em função da pressão confinante são apresentadas em conjunto no Gráfico 9. Neste gráfico se percebe que o comportamento da permeabilidade em função da pressão apresenta o mesmo comportamento para as três amostras.

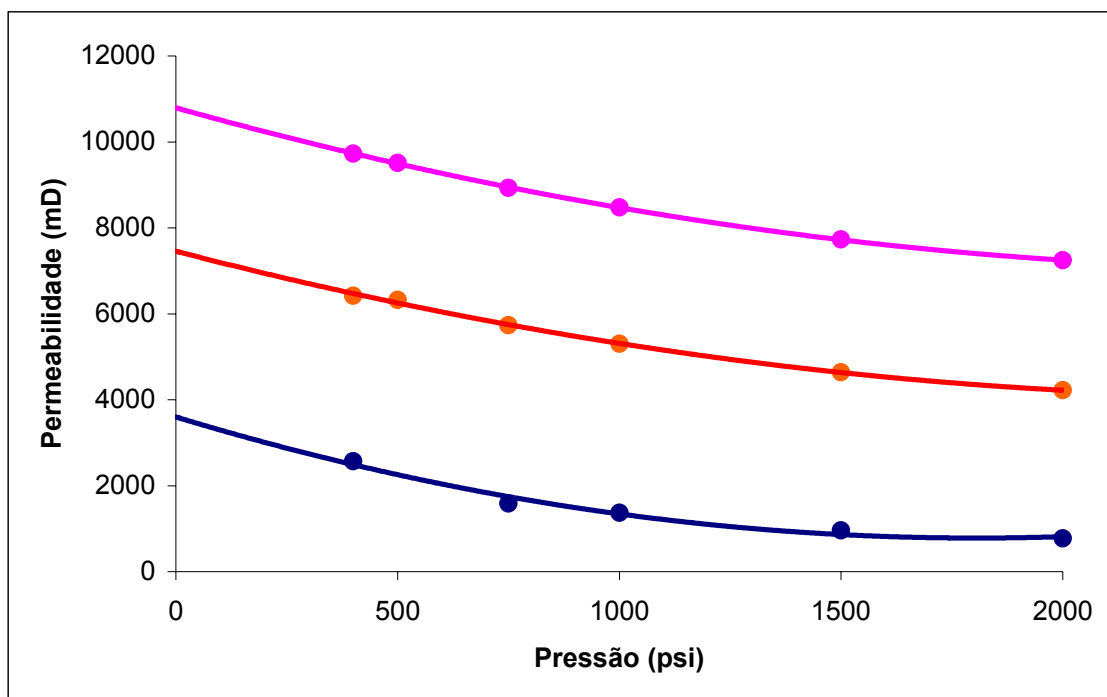


Gráfico 9 – *Curvas de comportamento da permeabilidade em função da pressão, para as amostras inconsolidadas selecionadas.*

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que o permo-porosímetro a gás pode ser utilizado com sucesso na medição das propriedades do espaço poroso de sedimentos inconsolidados. Para o conjunto de amostras estudadas de solo arenoso, os valores medidos de porosidade apresentaram valor médio de 36,9%, desvio-padrão de 1,53%, porosidade máxima de 39,7% e mínima de 32,5%. Já os valores medidos de permeabilidade apresentaram média de 6,2D, desvio-padrão de 1,8D, permeabilidade máxima de 9,7D e mínima de 2,6D.

A comparação entre os perfis de porosidade e permeabilidade com os seus respectivos perfis de teor de argila e silte mostra que existe uma correlação direta entre os perfis de permeabilidade e os perfis de teor de argila e silte, o mesmo não ocorrendo em relação aos perfis de porosidade.

O uso da equação de Kozeny-Carman para estimar os valores de superfície específica a partir dos valores de porosidade e permeabilidade medidos se mostrou adequado, mesmo tendo sido utilizado o valor constante sugerido na literatura para a constante C de Kozeny-Carman. A excelente correlação entre os perfis de argilosidade e de superfície específica demonstra essa eficiência da equação de Kozeny-Carman na predição dos valores de superfície específica das amostras estudadas. O fato de a medição dos teores de argila e silte, usados na referida correlação, haverem sido medidos através do método de análise granulométrica, o qual é totalmente independente das análises efetuadas no permo-porosímetro, reforça a convicção da eficiência da equação de Kozeny-Carman na avaliação da superfície específica, bem como da precisão dos valores medidos pelo permo-porosímetro.

O efeito da pressão confinante mínima exigida pelo equipamento sobre os valores medidos de porosidade e permeabilidade é relativamente baixo, especialmente no caso da porosidade. A pressão mínima tende a induzir, em solos superficiais, valores mais baixos de porosidade e permeabilidade do que seriam medidos sob pressão ambiente. No entanto, uma fonte de erro inerente às medidas laboratoriais é a deformação das amostras durante a sua coleta, que por sua vez tende, às vezes, a aumentar os valores medidos de porosidade e permeabilidade. Dessa forma, há uma tendência de haver uma compensação, ao menos parcial, dessas duas fontes de erro independentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabral J. 2000. Movimento das águas subterrâneas. *In*: F.A.C. Feitosa & J. Manoel F^o (eds.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM/UFPE, Fortaleza, cap. 3, p 35-51.
- Carman, P. C. 1937. Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 15, 160.
- Core Laboratories Instruments 2003. *Quick Start Manual for Ultra Poro-Perm 500*.
- Jin G., Patzek T. W., Silin D.B. 2004. *Direct Prediction of the Absolute Permeability of Unconsolidated and Consolidated Reservoir Rock*. *In*: SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, Texas, U.S.A.
- Kozeny, J. 1927. Stz. ber. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa, 136, 271.
- Matheron G. 1967. *Éléments pour une théorie des milieux poreux*. Masson et C^{ie} Éditeurs, Paris, 166p.
- Mitchell, J.K. 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons Inc, New York, 422p.
- Monicard, R.P. 1980. *Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis*. Institut français du pétrole publications. Editions Technip. 168p.
- Nascimento, R. 2002. *Atlas Ambiental de Florianópolis*. Instituto Laurus, Florianópolis.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. 1987. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag Inc, New York, 533p.
- Scheidegger A. E. 1974. *The physics of flow through porous media*. University of Toronto Press, Toronto and Buffalo, 353p.
- Wyllie, M.R.J. & Gregory, A.R. 1955. *Fluid flow through unconsolidated porous aggregates: effects of porosity and particle shape on Kozeny-Carman constants*. Industry and Engineering Chemistry, 47 (7): 1379-1388.

Fatores de Conversão

$$1 \text{ polegada} = 2,540 \text{ cm}$$

$$1 \text{ darcy} = 0,987 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ g/cm s}$$

$$1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psi}$$

Para a água a 23°C:

$$1 \text{ cm/s} = 1,04 \times 10^3 \text{ darcy}$$

ANEXO I

Rotina de operação do equipamento.

1. Calibração do equipamento:

- a) Clicar em *Vpore Calibration*.
- b) Selecionar o tamanho da amostra padrão: *1 inch*
- c) Medir o volume morto:
 - Abrir a válvula do suspiro da câmara confinante.
 - Fechar êmbolo inferior.
 - Fechar a válvula do suspiro da câmara confinante.
 - Abaixar êmbolo superior até atingir êmbolo inferior, verificar se a marcação na haste do êmbolo está no nível inicial.
 - Seguir instruções na tela. Para item 2 a pressão de nitrogênio não atingirá 95psi mas sim ~85psi
 - Ao final liberar pressão confinante.
- d) Medir volume de referência:
 - Retirar êmbolo inferior.
 - Abrir a válvula do suspiro da câmara confinante.
 - Levantar êmbolo superior proporcionalmente ao tamanho da amostra.
 - Inserir amostra na câmara de compressão
 - Fechar êmbolo inferior.
 - Abaixar êmbolo superior até atingir a amostra, checar marcação na haste do êmbolo.
 - Seguir instruções na tela.
- e) Zerar os registros de permeabilidade: no Menu , clicar em ZERO e selecionar os tópicos necessários.

2. Colocação da amostra:

- a) Pesar amostra.
- b) Medir comprimento e diâmetro da amostra.
- c) Retirar êmbolo inferior.
- d) Abrir a válvula do suspiro da câmara confinante.
- e) Levantar êmbolo superior proporcionalmente ao tamanho da amostra.
- f) Inserir amostra na câmara de compressão
- g) Fechar êmbolo inferior.

- h) Abaixar êmbolo superior até atingir a amostra, checar marcação na haste do êmbolo
- i) Fechar a válvula do suspiro da câmara confinante.
- j) Aplicar a pressão confinante desejada (mínimo 400psi)

3. Medindo o Volume de poros:

- a) Checar se válvulas do êmbolo inferior e superior estão voltadas para o porosímetro.
- b) Regular a pressão de saída do tubo de nitrogênio para o valor Máximo ~85psi
- c) Clicar em *Measure Vpore*, e seguir instruções.
- d) Ao final da medição, liberar gás de dentro da câmara de compressão.

4. Medindo a permeabilidade.

- a) Abaixar a pressão de saída do tubo de nitrogênio para ~70 psi
- b) Mudar válvulas do êmbolo inferior e superior para o permeâmetro.
- c) Abrir a válvula *Source* no console do permeâmetro.
- d) Geralmente a pressão de saída do tubo de nitrogênio cai, então se deve checar novamente e regular para ~70psi.
- e) Checar se fluxos e diferença de pressão estão ok. Se não, regula-los.
- f) Clicar em *Measure*, aguardar estabilização da permeabilidade.
- g) Clicar em *Proceed to next*, e a permeabilidade estará medida e salva.
- h) Após medição, fechar a válvula *Source* no console do permeâmetro.
- i) Aliviar pressão confinante.
- j) Abrir a válvula do suspiro da câmara confinante.
- k) Retirar êmbolo inferior.

ANEXO II

Tabela 1 - Resultados obtidos diretamente e indiretamente a partir do método utilizado neste trabalho.

K = condutividade hidráulica para água a 22°C.

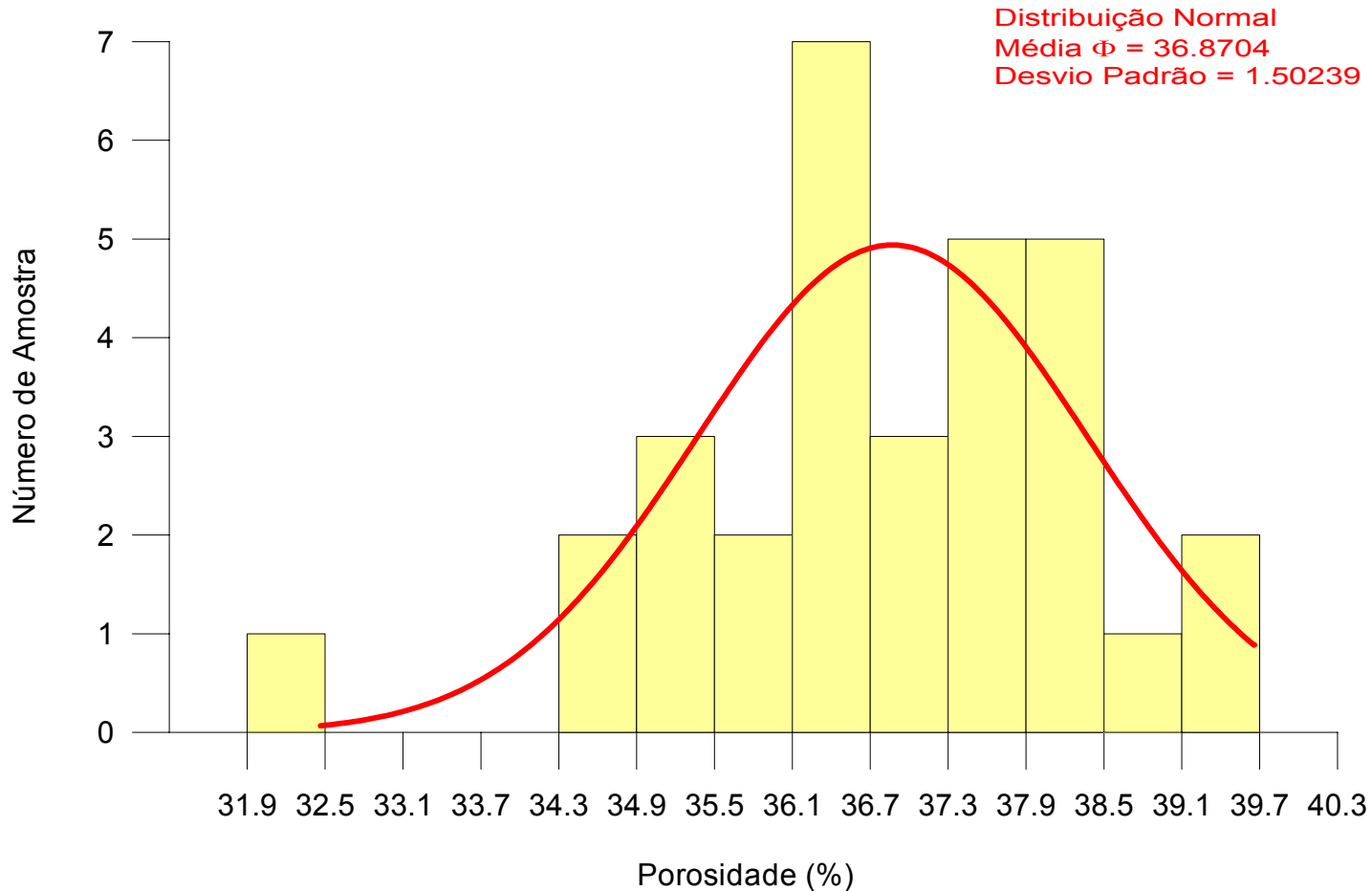
Amostra	L (cm)	Diâmetro (cm)	Vol. (cc)	Peso (g)	Massa Específica (g/cc)	P. Conf. (psi)	V. Poros (cc)	k (mD)	Porosidade (%)	Sup. Esp. (1/cm)	K (cm/s)
SD2 - 001A	5,664	2,532	28,52	44,7	1,567	400	9,8555	4418	34,6	660	3,78E-03
SD2 - 001	7,29	2,536	36,82	58,3	1,583	400	13,0161	5688	35,3	610	4,87E-03
SD2 - 002	8,587	2,51	42,49	64,5	1,518	400	14,9578	9073	35,2	479	7,77E-03
SD2 - 003	8,56	2,42	39,37	64,4	1,636	400	14,8469	9466	37,7	540	8,11E-03
SD2 - 004	8,453	2,483	40,93	67,7	1,654	400	14,9929	9727	36,6	502	8,33E-03
SD2 - 005	8,393	2,49	40,87	67,9	1,661	400	15,4597	5631	37,8	705	4,82E-03
SD2 - 006	8,312	2,458	39,44	61,8	1,567	400	15,0522	4931	38,2	768	4,22E-03
SD2 - 007	7,955	2,561	40,98	60,6	1,479	400	14,7173	2567	35,9	937	2,20E-03
SD2 - 008	8,676	2,34	37,31	62,4	1,672	400	14,6881	4926	39,4	821	4,22E-03
SD2 - 009	8,653	2,511	42,85	60,1	1,403	400	16,5294	5045	38,6	777	4,32E-03
SD2 - 010	8,646	2,603	46,01	61,6	1,339	400	16,7766	5302	36,5	673	4,54E-03
SD2 - 011	7,618	2,485	36,95	59,8	1,619	400	13,5568	8048	36,7	553	6,89E-03
SD2 - 012	8,361	2,445	39,26	62,1	1,582	400	14,728	4853	37,5	747	4,16E-03
SD2 - 013	8,609	2,412	39,34	61,4	1,561	400	15,001	4890	38,1	770	4,19E-03
SD2 - 014	8,698	2,482	42,08	66,5	1,580	400	15,2761	5275	36,3	669	4,52E-03
SD2 - 015	7,854	2,661	43,68	61,2	1,401	400	14,1803	4607	32,5	571	3,95E-03
SD2 - 016	8,512	2,575	44,33	72,8	1,642	400	16,5073	6158	37,2	653	5,27E-03
SD3 -001	8,465	2,55	43,23	66,2	1,531	400	15,0487	6310	34,8	561	5,40E-03
SD3 -002	8,323	2,573	43,28	67,4	1,557	400	15,4728	8197	35,8	520	7,02E-03
SD3 -003	7,562	2,581	39,56	63,4	1,602	400	13,8981	7145	35,1	537	6,12E-03
SD3 -004	8,414	2,526	42,17	69,8	1,655	400	15,2886	4967	36,3	687	4,25E-03
SD3 -005	8,178	2,409	37,27	59	1,583	400	14,7806	3958	39,7	930	3,39E-03
SD3 -006	8,631	2,503	42,47	62,2	1,465	400	15,8598	3642	37,3	854	3,12E-03
SD3 -007	8,407	2,562	43,34	63,1	1,456	400	16,1409	5462	37,2	693	4,68E-03
SD3 -008	8,719	2,548	44,46	64,5	1,451	400	16,7699	5656	37,7	699	4,84E-03
SD3 -009	8,626	2,565	44,57	64,6	1,449	400	16,478	8722	37,0	540	7,47E-03
SD3 -010	8,622	2,574	44,87	65	1,449	400	16,4167	6421	36,6	616	5,50E-03
SD3 -011	8,624	2,523	43,12	65,7	1,524	400	16,5742	8093	38,4	609	6,93E-03
SD3 -012	8,656	2,484	41,95	64,4	1,535	400	15,9931	7797	38,1	609	6,68E-03
SD3 -013	8,404	2,53	42,25	63,4	1,501	400	15,4347	7335	36,5	574	6,28E-03
SD3 -014	8,437	2,488	41,02	63,2	1,541	400	15,7132	7690	38,3	620	6,59E-03

L = comprimento amostra, Vol. = volume amostra, P. Conf. = pressão confinante, V. Poros = volume de poros, k = permeabilidade absoluta, Sup. Esp. = superfície específica.

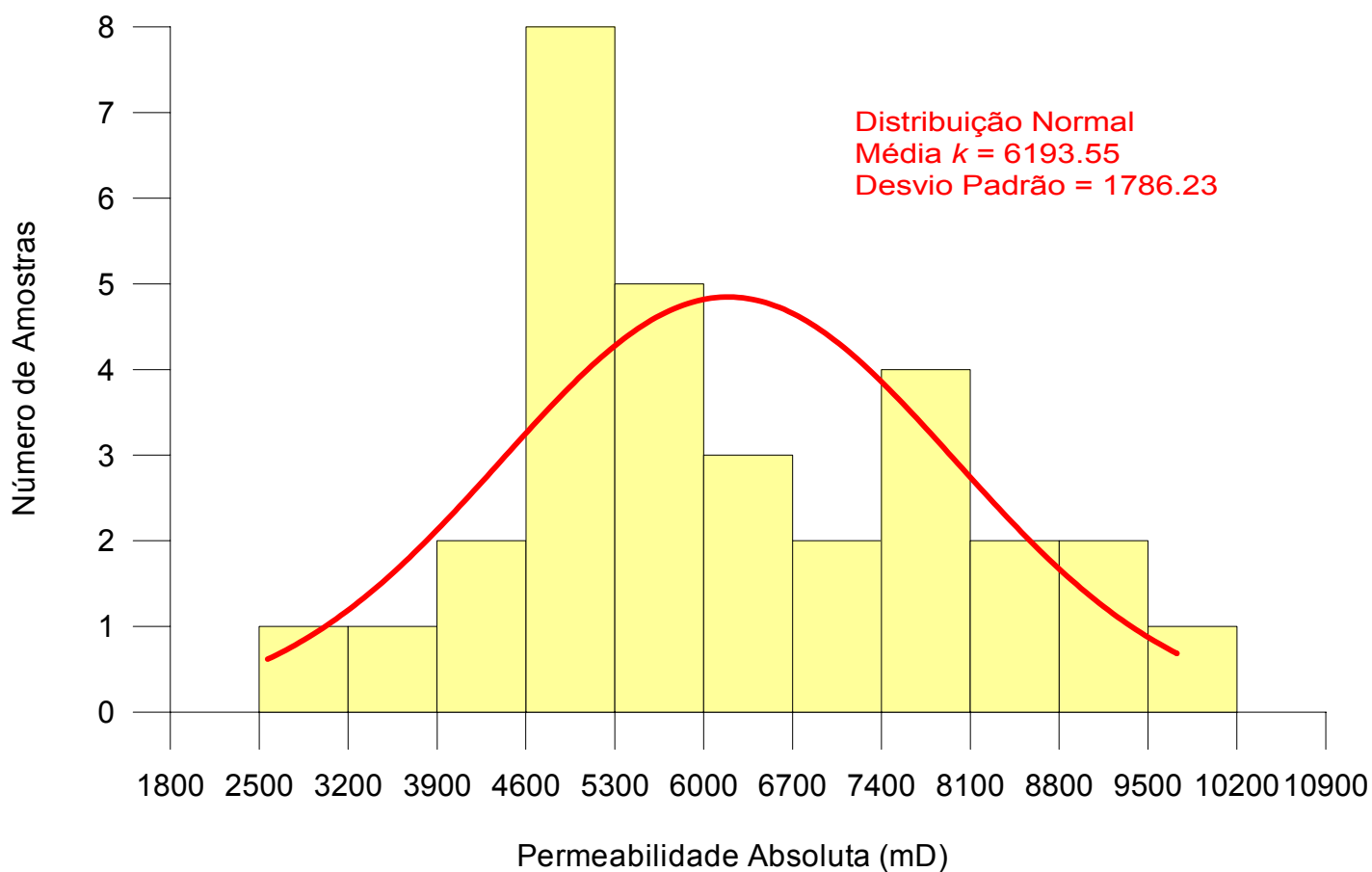
Tabela 2 e Gráficos - Estatística Básica

Estatística Básica	Porosidade (%)	k (mD)	Massa Específica (g/cc)	Sup. Esp. (1/cm)	K (cm/s)
Valor Médio	36,9	6,2	1,54	661	5,30E-03
Desvio Padrão	1,53	1,8	0,09	120	1,56E-03
Valor Max	39,7	9,7	1,67	937	8,33E-03
Valor Min	32,5	2,6	1,34	479	2,20E-03

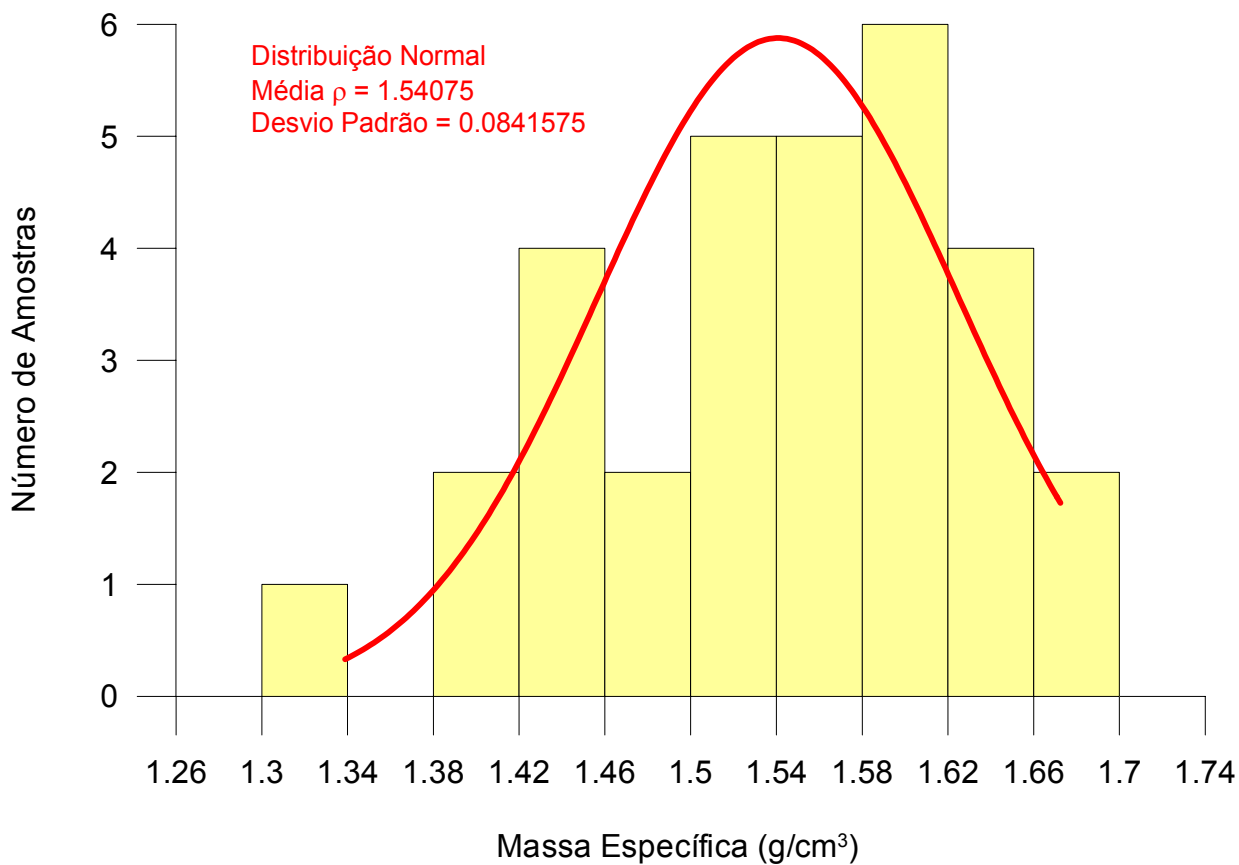
Histograma - Porosidade



Histograma - Permeabilidade Absoluta



Histograma - Massa Específica



Histograma - Superfície Específica

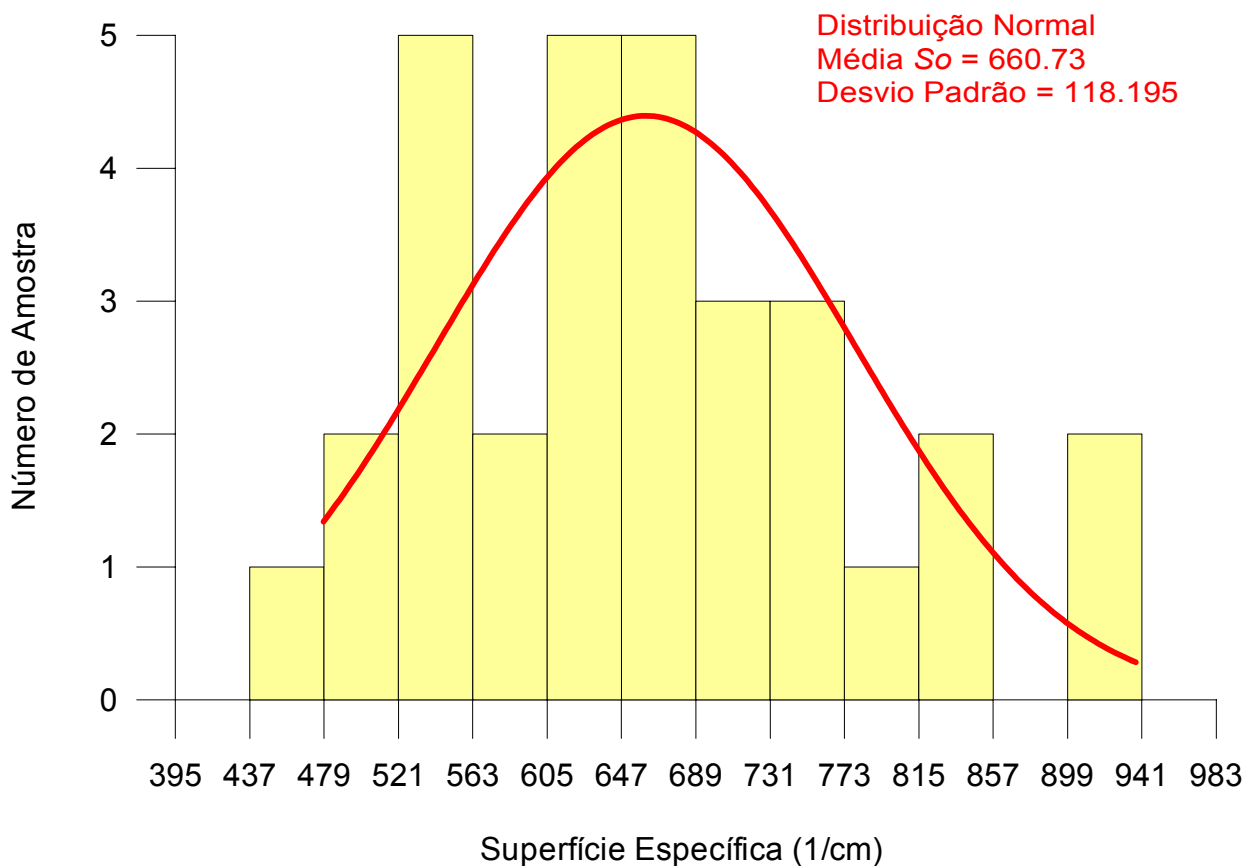


Tabela 3 - Resultados dos ensaios extraídos de Salgueiro (no prelo).

Amostra	Profundidade de a		% de Argila + Silte	Umidade Média (hm%)	Densidade Real dos Grãos (D20)	Porosidade Real	Porcentagem de Saturação de Vazios
SD2 - 001A	0,00	0,25	7,70	15,35	2,57	58,12	16,14
SD2 - 001	0,25	0,50	6,40	5,65	2,59	46,23	9,63
SD2 - 002	0,50	0,75	4,80	7,00	2,62	53,21	9,36
SD2 - 003	0,75	1,00	4,10	9,10	2,63	53,4	10,9
SD2 - 004	1,00	1,25	3,40	6,80	2,64	44,02	11,59
SD2 - 005	1,25	1,50	7,80	10,30	2,64	45,52	19,55
SD2 - 006	1,50	1,75	13,10	15,60	2,62	34,59	40,8
SD2 - 007	1,75	2,00	18,80	21,40	2,74	36,08	55,24
SD2 - 008	2,00	2,25	13,40	21,10	2,62	30,59	73,01
SD2 - 009	2,25	2,50	10,80	22,35	2,75	32,02	73,79
SD2 - 010	2,50	2,75	10,20	27,30	2,75	35,83	75,3
SD2 - 011	2,75	3,00	5,60	28,55	2,64	34,27	57,95
SD2 - 012	3,00	3,25	10,60	27,35	2,80	34,56	58,44
SD2 - 013	3,25	3,50	9,50	25,95	2,66	32,4	60,49
SD2 - 014	3,50	4,00	6,70	22,30	2,71	45,85	38,26
SD2 - 015	4,00	4,50	6,80	24,15	2,23	18,64	98,97
SD2 - 016	4,50	5,00	5,40	18,30	2,65	35,08	46,46
SD3 -001	0,00	0,25	5,10	14,70	2,58	45,54	24,59
SD3 -002	0,25	0,50	5,40	12,05	2,61	44,61	22,26
SD3 -003	0,50	0,75	4,30	9,35	2,60	53,52	13,55
SD3 -004	0,75	1,00	6,30	10,90	2,65	44,68	21,67
SD3 -005	1,00	1,25	15,10	21,55	2,61	34,22	55,05
SD3 -006	1,25	1,50	17,30	22,60	2,38	26,69	87,29
SD3 -007	1,50	1,75	11,70	28,15	2,38	19,24	81,5
SD3 -008	1,75	2,00	9,40	27,55	2,59	27,1	82,55
SD3 -009	2,00	2,50	6,70	26,80	2,61	32,42	78,04
SD3 -010	2,50	3,00	6,70	29,80	2,51	24,82	98,1
SD3 -011	3,00	3,50	5,70	21,40	2,62	34,44	60,98
SD3 -012	3,50	4,00	6,00	22,85	2,60	32,78	71,97
SD3 -013	4,00	4,50	6,90	24,85	2,64	18,98	99,15
SD3 -014	4,50	5,00	6,30	26,55	2,64	37,23	55,32

Tabela 4 - Resultados da variação da porosidade e permeabilidade em função da variação de pressão.

Amostra	L (cm)	Diâmetro (cm)	Vol. (cc)	Peso (g)	M. Esp. (g/cc)	P. Conf. (psi)	V. Poros (cc)	k (mD)	Porosidade (%)
SD2 - 007	7,955	2,561	40,98	60,6	1,479	400	14,7173	2567	35,9
SD2 - 007	7,96	2,54	40,33	60,7	1,505	750	13,4841	1584	33,4
						1000	12,8664	1374	31,9
						1500	11,8341	958	29,3
						2000	11,2677	773	27,9
SD2 - 004	8,453	2,483	40,93	67,7	1,654	400	14,9929	9727	36,6
						500	14,8238	9512	36,2
						750	14,5275	8929	35,5
						1000	14,3152	8475	35,0
						1500	13,8854	7729	33,9
SD3 -010	8,622	2,574	44,87	65,0	1,449	2000	13,5993	7246	33,2
						400	16,4167	6421	36,6
						500	16,2858	6324	36,3
						750	15,7865	5736	35,2
						1000	15,4452	5300	34,4
						1500	14,9113	4638	33,2
						2000	14,5538	4221	32,4

L = comprimento amostra, Vol. = volume amostra, M. Esp. = massa específica, P. Conf. = pressão confinante, V. Poros = volume de poros, k = permeabilidade absoluta